



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**LETECKÝ ÚSTAV**

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**NÁVRH KONSTRUKCE KOMPOZITNÍHO CHASSIS  
VOZIDLA FORMULE STUDENT**

DESIGN OF COMPOSITE CHASSIS FOR FORMULE STUDENT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Lukáš Gregor

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Michal Mališ, Ph.D.

**BRNO 2018**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Lukáš Gregor**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Michal Mališ, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh konstrukce kompozitního chassis vozidla Formule Student

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Formule Student poskytuje studentům příležitost k řešení praktických konstrukčních problémů a výsledky jejich práce napomáhají k reprezentaci VUT v Brně. Tým TU Brno Racing v poslední sezóně vyrobil svůj první monokok využitím sendvičové konstrukce a plánuje v tomto trendu pokračovat. Současným úkolem je upravit geometrii, vylepšit technologii výroby, použít pokročilejší materiály, zvýšit tuhost rámu a zároveň snížit váhu, To vše v rámci pravidel soutěže Formula Student.

### Cíle bakalářské práce:

1. Úvod do problematiky.
2. Rešerše možných řešení.
3. Konstrukční návrh chassis.
4. Zhodnocení navržené konstrukce po funkční, výrobně technologické a ekonomické stránce.

### Seznam doporučené literatury:

2017-2018 Formula SAE Rules, 2016.

<http://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%209.2.16a.pdf>

ASM Handbook: Volume 21, Composites, ASM International, The Material Information Company, 2001.

NIU, C. Y. M.: Composite Airframe Structure, Hong Kong Conmilit Press Ltd., 664 stran, 2005.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá novým konstrukčním návrhem a výrobou rámu vozidla Formule student podle aktuálních pravidel se zaměřením na kompozitní část. Teoretická část je zaměřená na současně používané koncepty v této soutěži a přibližuje využití kompozitních sendvičových materiálů. Těžištěm práce je část konstrukční, kde jsou popsány nejdůležitější kroky iteračního procesu k vytvoření rámu, zejména ergonomie, bezpečnost a spojení s nápravami. Poslední část je věnována výrobnímu procesu. Výstupem této práce je funkční rám monopostu Dragon 8.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Chassis, kompozit, monokok, sendvičová struktura, prepreg, formule student

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with structural design and manufacturing of Formula student chassis according the latest rules with primary aim to composite monocoque. In theoretic part is briefly described Formula student and the team. It shows actual used designs of chassis in competition and characteristics of composites and sandwich structures. In design section is described the design of the chassis due to safety, ergonomics and connections to other parts of the car. At the end is shown the manufacturing process of CFRP monocoque. The output of this thesis is made chassis of Dragon 8.

## KEYWORDS

Chassis, composite, monocoque, sandwich structure, prepreg, formula student

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GREGOR, L. *Návrh konstrukce kompozitního chassis vozidla Formule student*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký Ústav. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Mališ, Ph.D.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michala Mališe, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2018

.....

Lukáš Gregor

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval mé rodině za její podporu nejen v průběhu studia. Své přítelkyni, která mi byla oporou a za její trpělivost. Díky patří členům týmu, bez kterých bych nemohl své nápady uvést ve skutečnost a lidem z řad sponzorů, které bylo nezbytné zapojit do výroby.

V neposlední řadě také Ing. Michalu Mališovi, Ph.D. za vedení mé práce, kontrolu bezpečnostní dokumentace, jeho ochotu a nadšení. Díky!

## OBSAH

Úvod.....	9
1 Teoretická část .....	11
1.1 Formule Student .....	11
1.1.1 Disciplíny .....	11
1.2 TU Brno Racing.....	12
1.3 Nejdůležitější parametry .....	14
1.3.1 Hmotnost .....	14
1.3.2 Silové působení .....	14
1.3.3 Torzní tuhost.....	14
1.3.4 Ohybová tuhost.....	15
1.3.5 Příčná tuhost .....	15
1.3.6 Lokální tuhost.....	16
1.3.7 Ergonomie .....	16
1.4 Přehled používaných konceptů chassis ve Formuli student .....	17
1.4.1 Prostorový trubkový rám .....	17
1.4.2 Celokarbonové chassis .....	17
1.4.3 Hybridní konstrukce .....	18
1.4.4 Neobvyklé konstrukce .....	19
1.5 Kompozitní materiály .....	19
1.5.1 Výztuž .....	20
1.5.2 Matrice .....	21
1.5.3 Výroba laminací .....	21
1.6 Sendvičové konstrukce .....	21
1.6.1 Potahy .....	22
1.6.2 Jádrové materiály.....	22
2 Konstrukční část - návrh.....	24
2.1 Koncept .....	24
2.1.1 Popis konstrukce.....	25
2.1.2 Stanovené cíle.....	25
2.2 3D model .....	26
2.3 Ergonomie .....	27
2.4 Pravidla omezující geometrii rámu .....	28
2.4.1 Percy .....	28
2.4.2 Bezpečnost při převrácení .....	29



2.4.3	Volné prostory pro rychlé opuštění vozu .....	29
2.5	Přední oblouk.....	30
2.6	Výřez turbodmychadla .....	32
2.7	Třetí jízdní tlumič na přední nápravě .....	34
2.8	Třetí jízdní tlumič na zadní nápravě .....	35
2.9	Návrh panelů .....	37
2.10	Mechanické testování .....	40
2.11	Spojení monokoku a trubkového rámu.....	43
2.12	Řešení uložení držáků ramen a tlumičů.....	45
2.13	Finální CAD model .....	45
3	Konstrukční část - výroba.....	46
3.1	Problémy s výrobou sendvičových panelů.....	46
3.2	Pozitivní formy .....	46
3.3	Negativní formy.....	48
3.4	Laminování.....	50
3.5	Měření torzní tuhosti.....	54
3.6	Zhodnocení .....	54
	Závěr .....	55
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	58
	Seznam příloh .....	60

## ÚVOD

Formule student je jednou z největších příležitostí pro studenta na technické univerzitě, jak získat drahocenné zkušenosti a aplikovat v praxi znalosti nabitě studiem, ověřit si je a prohloubit ještě dříve, než nastoupí do práce. Není to pouze o návrhu a výrobě vozu, ale o získání řady zajímavých kontaktů a zkušeností. Nabízí možnost podílet se na výzkumu zajímavých technologií, organizaci práce, akcí a lidí, komunikaci s firmami, týmové spolupráci, a především získání schopnosti rychlého rozhodování a řešení problémů. Toto jsou všechno vlastnosti, které nabízí toto motivující prostředí a které jsou vysoce ceněny na trhu práce. Formule student umožňuje vychovávat ambiciózní, sebevědomé a schopné inženýry.

Žijeme v dynamické době, svět se neustále zrychluje. Sportovci podávají lepší výkony a na nároky na efektivitu stoupají. Pro každého inženýra v motorsportu je jasným cílem posunout hranici vozu, aby byl pokaždé v cíli o něco dříve. Jednou z důležitých vlastností, která na to má vliv je akcelerace. Z Newtonova druhého zákona  $F = ma$  jasně vyplývá, že pokud má vozidlo rychleji akcelarovat musí se zvětšit síla, která vůz pohání nebo redukovat jeho hmotnost. Redukovaná hmotnost má pozitivní vliv nejen na zrychlení, ale také na spotřebu paliva a celkovou ovladatelnost vozu. Proto je cílem této bakalářské práce návrh nového rámu formule, se sníženou hmotností za současného zvýšení tuhostí. Výstupem tohoto snažení bude návrh a vyrobený funkční rám z kompozitních materiálů.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 FORMULE STUDENT

Formule student je Evropská odnož Formule SAE (Society of Automotive Engineers), která byla založena začátkem 90. let v Americkém Texasu. Primárním cílem projektu je vychovávat studenty převážně technických vysokých škol a prohloubit jejich znalosti a zkušenosti před nástupem do zaměstnání. Jedná se o takový most mezi univerzitou a prací.

Myšlenkou tohoto projektu, je fiktivní firma tvořená studenty, kteří mají za úkol každý rok vytvořit jednomístné sportovní vozidlo formulového typu pro neprofesionální víkendové jezdce.



*Obr. 1-1 Hromadná fotka všech týmů na závodech Formula Student Germany [1]*

S tímto vozidlem se týmy účastní závodů a soupeří s konkurencí, kterou momentálně tvoří asi dalších 600 týmů. Každý monopost po příjezdu na závod musí být podroben důkladné technické přejímce, kde probíhá kontrola bezpečnosti vozu a ověřuje se dodržení předepsaných pravidel. Zároveň probíhá test náklonu, hluku a funkčnosti brzdného systému. Pokud se týmu podaří projít inspekcí, dostane možnost účastnit se dynamických disciplín a bojovat o přední umístění.

### 1.1.1 DISCIPLÍNY

Nejedná se o klasický motorsport, ale o výukový projekt. Proto nevyhrává pouze první v cíli, ale hodnotí se i konstrukce vozu a znalosti týmu. Celkové hodnocení se skládá z několika statických a dynamických disciplín viz. Tab. 1.

Statické disciplíny sestávají z diskuze s váženými odborníky s dlouholetou praxí v daném oboru. Jedná se o prezentaci Business plánu, kde tým představí svou vizi a kalkulaci jakým

způsobem by uvedl monopost na trh a snaží se získat potenciální investory. Nákladová a výrobní prezentace se zabývá podrobnou dokumentací všech komponent na vozidle. Všechny materiály, výrobní procesy a úkony nutné k postavení musí být zaznamenány. Je hodnocena úplnost a porozumění těmto procesům. Poslední a nejdůležitější je Design prezentace, což je prezentace konstrukčního návrhu vozidla. Studenti představují své nápady a za pomoci dokumentace s koncepty, výpočty, návrhy a simulacemi se snaží porotce přesvědčit, že jejich návrh je nejlepší.

Další částí jsou dynamické disciplíny. Akcelerace je disciplínou, kde se měří čas, za který vozidlo urazí přímou dráhu 75 m s pevným startem. Skid-pad neboli kruhový test prověřuje podvozek vozidla a jeho schopnosti ve stavu ustáleného zatáčení. Autokros je jízdou na technicky náročné trati se spoustou zatáček, která je zároveň kvalifikační do poslední disciplíny Endurance. Tato disciplína je 22 km dlouhý závod s povinnou výměnou řidičů v půli závodu. Hlavním cílem této disciplíny je prověření spolehlivosti vozidla a vítězí nejrychlejší vůz s nejmenším počtem sražených kuželů. Součástí této disciplíny je i měření spotřeby paliva.

*Tab. 1 Bodové hodnocení disciplín*

Celkově	1000
Statické disciplíny:	225
Prezentace business plánu	75
Nákladová a výrobní dokumentace	100
Prezentace konstrukčního návrhu	150
Dynamické disciplíny:	675
Skid-pad	75
Akcelerace	75
Autokros	100
Endurance	325
Spotřeba	100

Vzhledem ke skutečnosti, že všechny vozy jsou prototypy postavené studenty je velká pozornost kladená na bezpečnost. Tratě jsou pouze na otevřených prostranstvích a jsou úzké, technicky náročné se spoustou zatáček vystavěné z kuželů. Tímto se daří omezit rychlost průjezdu na průměrných 60 km/h a maximálních 120 km/h. V důsledku to ovlivňuje i návrh samotných vozů, které jsou dimenzovány na profily těchto tratí a disciplín.

## 1.2 TU BRNO RACING

Tým TU Brno Racing byl založen v roce 2010 a od té doby staví již 8. monopost. Začalo se prakticky od nuly a od té doby neustále probíhá evoluce vozidel Dragon. Každý rok se vozidlo stává lepším, vyspělejším a komplexnějším. V Tab. 2 lze vidět postupnou tendenci snižování hmotnosti za současného použití nových technologií. Dalším příkladem může být první aeropaket na Dragonu 4, přeplňovaný motor na Dragonu 5 nebo první monokok na Dragonu 7.

Tab. 2 Přehled rámových parametrů vozidel Dragon

Vozidlo	Celková hmotnost	Hmotnost rámu	Torzni tuhost	Technologie
Dragon 1	212 kg	---	---	prostorový trubkový rám – MAG
Dragon 2	200 kg	---	---	prostorový trubkový rám – MAG
Dragon 3	226 kg	36,5 kg	---	prostorový trubkový rám – MAG
Dragon 4	195 kg	30,8 kg	---	prostorový trubkový rám – TIG
Dragon 5	205 kg	37,3 kg	---	prostorový trubkový rám – TIG
Dragon 6	179 kg	31,8 kg	983 Nm/°	prostorový trubkový rám – TIG
Dragon 7	184 kg	31,7 kg	1874 Nm/°	hybridní rám – monokok (mokrý)
Dragon 8	---	27,9 kg	---	hybridní rám – monokok (prepreg)

Dragon 7 byl vůbec nejúspěšnější z týmových vozidel a podařilo se mu vyhrát závod Formula Student Czech a dosáhnout celkové 5. místo ve světovém žebříčku z více než 500 spalovacích týmů. Největší předností jeho hybridní konstrukce oproti předchozímu trubkovému rámu bylo zachování stejné hmotnosti za současného zvýšení torzní tuhosti o 80 %.



Obr. 1-2 Dragon 7 při svém slavnostním odhalení

Aktuálně se vyvíjí monopost Dragon 8. Cílem je především zachovat spolehlivost, ale zároveň zlepšit jízdní vlastnosti vozidla a aerodynamiku, snížit těžiště a centralizovat hmotnost vozu. V letošním roce půjde o druhý model částečně vyrobený z uhlíkových vláken. Poháněný bude jednoválcovým motorem Husqvarna FE 501 přepínaným turbodmychadlem. Z hlediska podvozku vozidla je největší změnou přidání třetích jízdních tlumičů na každou nápravu a výzkum a testování magnetoreologických tlumičů a kol vyrobených z uhlíkového kompozitu.



Obr. 1-3 Render návrhu monopostu Dragon 8

## 1.3 NEJDŮLEŽITĚJŠÍ PARAMETRY

### 1.3.1 HMOTNOST

Hmotnost není pouze skalární veličinou definující vlastnost vozidla. Její rozložení napříč vozem a výška těžiště významně ovlivňují chování vozu a distribuci sil na jednotlivé nápravy. Snížení těžiště umožňuje vozidlu vyšší boční zrychlení. Snížení momentu setrvačnosti centralizováním hmotnosti má přímý vliv na ovládání, rychlé zatáčení a celkovou stabilitu vozu. Proto je třeba se zaměřit na: [2]

- Snížení hmotnosti
- Snížení těžiště
- Centralizaci hmotnosti

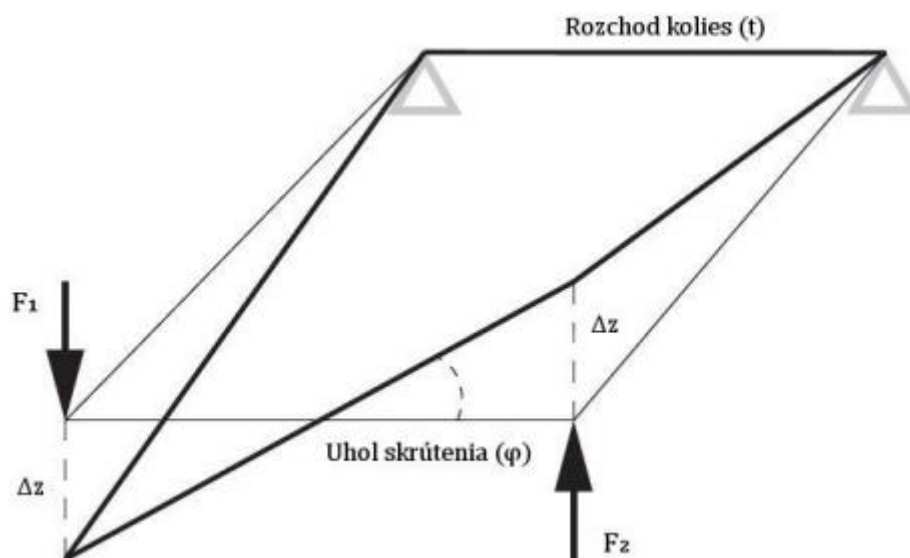
### 1.3.2 SILOVÉ PŮSOBENÍ

Celé chassis vozidla je zatíženo vnějšími a vnitřními silami. Vnější zatížení na vozidlo působí prostřednictvím přítlaku generovaným aerodynamickými prvky vozu nebo jako síly vznikající na pneumatikách vozidla. Vnitřním zatížením je samotná hmotnost vozu a řidič, ale také pohonná soustava, která generuje značné síly. Všechny tyto silové interakce se přenášejí do konstrukce pružným nebo pevným uložením a vznikají zde napětí a deformace. Napětí mohou způsobovat při nesprávném návrhu poškození v podobě prasklin, ale i vytrhnutí komponent, případně jiné selhání. Deformace pružného charakteru sice nemusejí způsobit selhání, ale jejich velikost značně ovlivňuje chování vozu.[3]

### 1.3.3 TORZNÍ TUHOST

Torzní tuhost je odolnost proti deformaci a natáčení rámu při torzním zatížení vozidla.

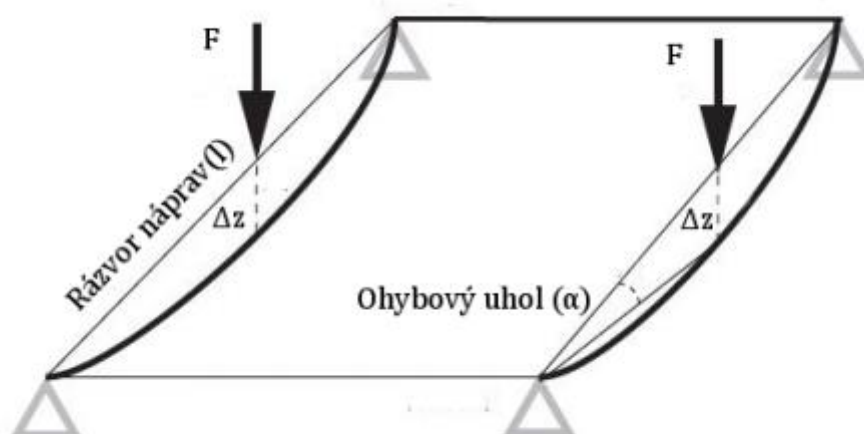




Obr. 1-4 Znáznornění torzní tuhosti [3]

#### 1.3.4 OHYBOVÁ TUHOST

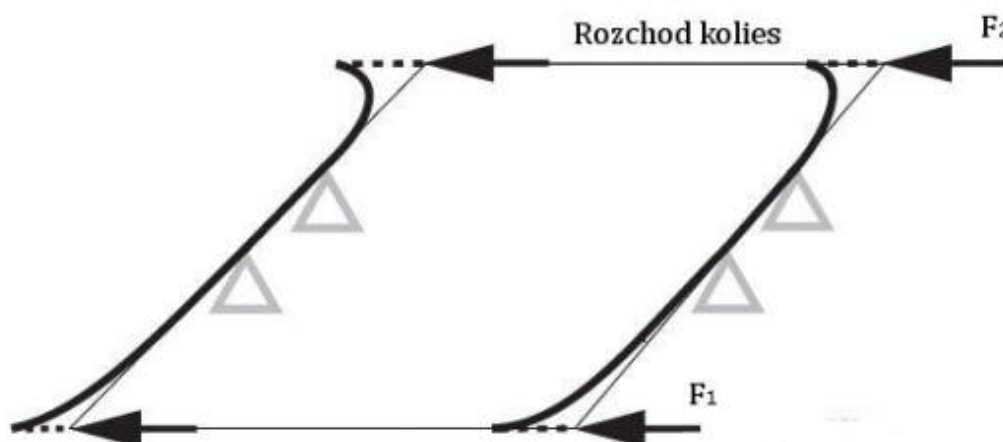
Ohybová tuhost je odolností proti deformaci při prudké akceleraci, brzdění nebo nájezdu na výmol, kdy dochází k přenosu síly ze zadní nápravy na přední nebo obráceně.



Obr. 1-5 Ohybové tuhosti [3]Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.

#### 1.3.5 PŘÍČNÁ TUHOST

Tuhost v příčném směru vyjadřuje odpor proti ohýbání chasis vozidla při příčném zatížení na přední a zadní nápravě. Tento typ zatížení vzniká při průjezdu zatáčkou vlivem odstředivých sil. Tato tuhost má vliv na stáčivost vozu.



Obr. 1-6 Znáznornění příčné tuhosti [3]

### 1.3.6 LOKÁLNÍ TUHOST

Lokální tuhost je tuhost v částech rámu, kde se nachází uložení zavěšení. Tuhost těchto bodů má vliv na nastavení odklonu a sbíhavosti kol. Pokud nejsou tato lokální místa dostatečně tuhá, dochází během jízdy ke změně těchto parametrů a chování vozu přestává odpovídat navržené kinematice.

### 1.3.7 ERGONOMIE

Neposledním důležitým parametrem je návrh kokpitu neboli řidičovy „kanceláře“. Pokud má pilot s vozem vítězit, je zcela nezbytné, aby se ve voze cítil komfortně. Během disciplíny Endurance ve voze tráví minimálně 15 minut a musí být stoprocentně koncentrovaný. [4] Připočteme-li k tomu vnější vlivy na řidiče jako prudké změny rychlosti a směru, při kterých dochází k přetížení až 3G, tak se ergonomie nedá zanedbat. Nejdůležitějšími prvky jsou:

- Dostatečný výhled na trať
- Sedačka jako opora těla
- Snadno dostupné ovládání



## 1.4 PŘEHLED POUŽÍVANÝCH KONCEPTŮ CHASSIS VE FORMULI STUDENT

Rám neboli chassis je základním kamenem vozu a jeho nosnou strukturou. V současné době se v soutěži používají především tři druhy konstrukce rámu a to prostorový trubkový rám, celokarbonové chassis a kombinace těchto dvou.

### 1.4.1 PROSTOROVÝ TRUBKOVÝ RÁM

Prostorový trubkový rám je tvořený příhradovou konstrukcí. Jedná se o nejčastěji používaný koncept ve formuli student. Jeho přednosti jsou nízké náklady a snadná vyrobiteľnosť. Nevýhody jsou nižší torzní tuhost, vyšší hmotnosť a konstruktér je omezen geometrií profilů předepsaných pravidly.

Možnou nadstavbou tohoto konceptu může být vyztužení trubkové části pevným spojením se sendvičovými panely, které zvýší bezpečnost, tuhost a pevnost vozu.



*Obr. 1-7 Rám formule Dragon 6*

### 1.4.2 CELOKARBONOVÉ CHASSIS

Jedná se o typ rámu tvořený sendvičovými panely, který má vnější potahy z uhlíkových vláken pevně spojené jádrem. Je to druh rámu používaný snad všemi předními týmy formulí s elektrickým pohonem. Jedná se o nejlehčí a nejtužší koncept. V tomto případě je konstruktér tvarově omezen pouze pravidly a velikostí šablon. Další výhodou je velká svoboda vyztužení jenom v místech a směrech, kde je to potřeba. Jeho nevýhodou jsou výrobní náklady a nutná pokročilá zkušenost práce s kompozity a časově náročná výroba.

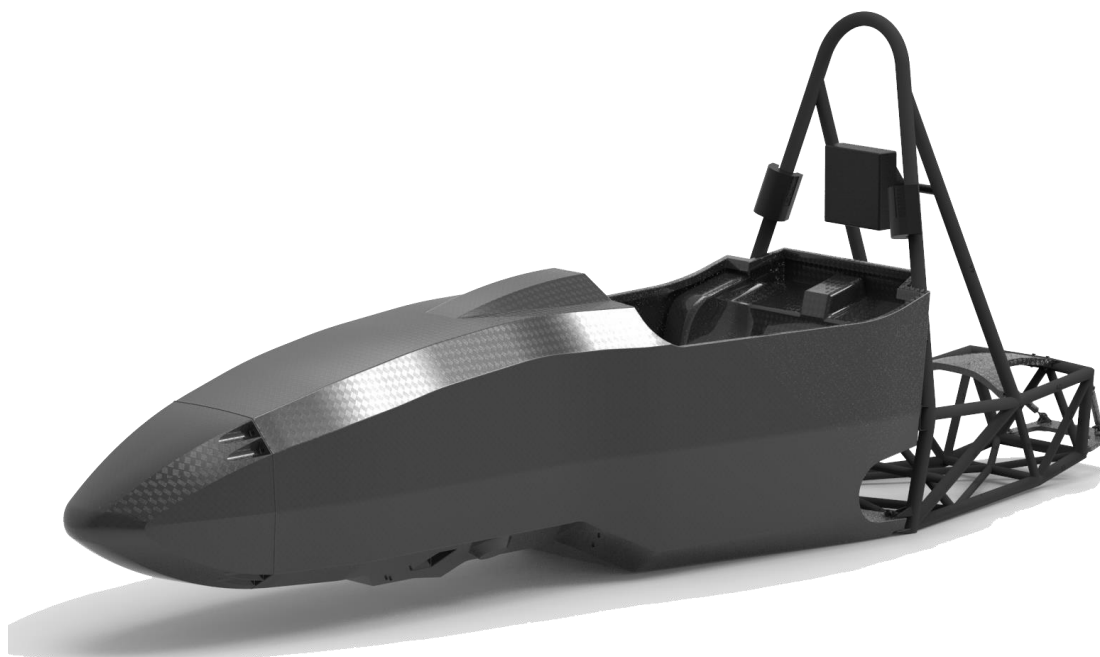


*Obr. 1-8 Celokarbonové chassis formule Pilatus švýcarského týmu AMZ [5]*

#### 1.4.3 HYBRIDNÍ KONSTRUKCE

V současnosti nejpoužívanější konstrukce u předních týmů spalovacích vozů. Jedná se o hybridní konstrukci, kde přední část je z uhlíkového kompozitu a zadní část nesoucí pohonnou jednotku je z prostorového trubkového rámu. Největší výhodou je servisovatelnost motoru a přístup do jeho zástavby. Nevýhodou je výroba náročnější než u celokarbonových rámu.

Tento koncept lze rozdělit na další dva z hlediska napojení monokoku a trubkového rámu vzhledem k hlavnímu oblouku. První způsob je zalaminování hlavního oblouku do monokoku a druhý má hlavní oblouk součástí trubkového rámu.



*Obr. 1-9 Hybridní konstrukce chassis vozidla Dragon 8*

#### 1.4.4 NEOBVYKLÉ KONSTRUKCE

V současné době se nejvíce používají tři koncepty zmíněné výše. Jejich výhody jasně převládají nad ostatními koncepty buď svou jednoduchostí výroby nebo přínosem na jízdní vlastnosti vozu. Nicméně se čas od času objevují týmy s neobvyklým konceptem.

##### HLINÍKOVÝ MONOKOK

Chassis je velice podobné uhlíkovému monokoku, ale potahy jsou tvořené hliníkovými plechy a jádra hliníkovou voštinou. Jde o lehkou konstrukci s vysokou tuhostí a pevností.

##### HYBRIDNÍ TRUBKOVÝ RÁM

Jedná se o unikátní konstrukci, kde jsou trubky z uhlíkového kompozitu vlepeny do ocelových uzlů. Tímto způsobem se dá ušetřit váha při zachování tuhosti. Složitost, výrobní náklady, nezbytné testování a obtížné opravy způsobují, že se tento koncept nepoužívá. Podle dostupných informací se tento vůz nikdy nezúčastnil dynamických disciplín.



Obr. 1-10 Hybridní rám s hliníkovým monokokem týmu BCU Racing [6]

#### 1.5 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

V posledních desítkách let zaznamenal obrovský rozmach průmysl zpracující CFRP (carbon fibre reinforced plastics) - plasty vyztužené uhlíkovými vlákny. Již se nejedná pouze o výsadu kosmického a leteckého průmyslu a Formule 1. V dnešní době se s těmito materiály setkáváme prakticky denně aniž bychom to věděli například jako se sportovním vybavením nebo sériovými vozy.

Obecně se kompozitní materiál definuje jako kombinace dvou nebo více materiálů, lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky v nich si zachovávají svou identitu, ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní [7]. Společně tyto materiály získávají vlastnosti, které značně převyšují vlastnosti jednotlivých složek samotných a otevírají prostor novým aplikacím. V případě uhlíkových kompozitů mluvíme o dvou složkách, a to výztuže z uhlíkových vláken

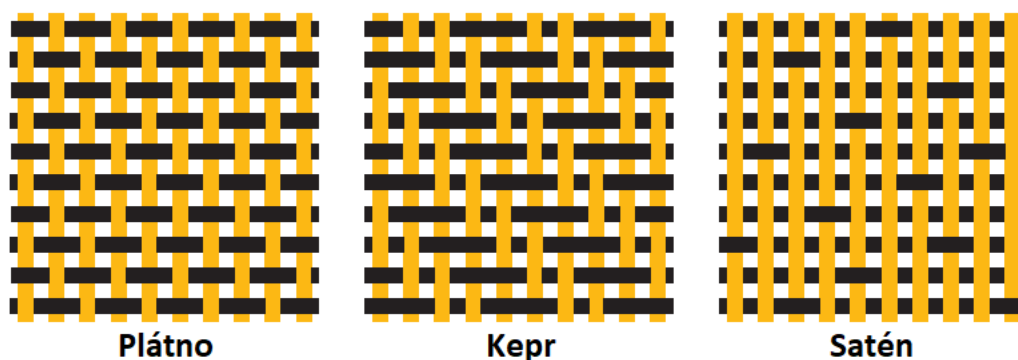
a polymerní matrice. Kompozit má zároveň oproti konvenčním materiálům anizotropní a nehomogenní vlastnosti, což znamená, že při zatěžování v různých směrech má odlišné chování a při složitých návrzích je nutné studovat mikro i makro mechaniku kompozitních materiálů. [8]

### 1.5.1 VÝZTUŽ

Vláknová výztuž je základem kompozitu a má dominantní vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Ve směru své délky má mnohem větší pevnost, než by měl kompaktní stejného materiálu. Její primární úlohou je přenos tahových napětí ve směru vláken.

Výztuž můžeme rozdělit na základě formy:

- Roving – „nekonečné“ vlákno používané k výrobě navíjením
- Rohož – nasekaná krátká vlákna slisována k sobě
- Tkanina – vlákna jsou utkána do vzorů, které se dají dále definovat podle gramáže a orientace vláken



Obr. 1-11 Základní vzory tkaných vazeb [9]

Nejpoužívanějšími druhy vláken jsou skleněné, uhlíkové a aramidové. Navzájem se liší vlastnostmi a také cenou. Skleněná vlákna jsou nejlevnější, nevedou proud, ale jejich pevnost a modul pružnosti je nízký. Naproti tomu uhlíkové vlákno má jak vysokou pevnost, tak modul pružnosti. Aramidová vlákna jsou na tom obdobně s pevností, modul mají nižší, ale vynikají svou vysokou odolností vůči abrazi.

Uhlíková vlákna můžeme rozdělit z hlediska tuhosti:

- HS (high strength) vlákna s velkou pevností
- IM (intermediate modulus) vlákna, u kterých je podstatě vyšší modul pružnosti a pevnost než u HS
- HM (high modulus) vlákna, která mají nejvyšší modul pružnosti, ale nižší pevnost než IM

### 1.5.2 MATRICE

Matrice plní v kompozitu funkci pojiva výztuže, zavádí síly do kompozitu a rozkládá je na vlákna. Zároveň má funkci ochrannou. Nejčastěji se používají termosetové pryskyřice jako polyester, vinylestery, epoxidy, fenoly nebo kyan-estery. Epoxidy se při výrobě konstrukčních částí používají nejvíce vzhledem k obecně dobrým mechanickým vlastnostem. Zejména pak malému smrštění a chemické odolnosti.

### 1.5.3 VÝROBA LAMINACÍ

Existuje mnoho metod výroby laminátu. O jejich použití rozhoduje několik faktorů. Zejména to jsou sériovost výroby, komplexnost a velikost dílu, cena, kvalita povrchu a požadované mechanické vlastnosti

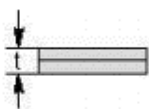
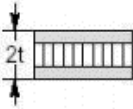
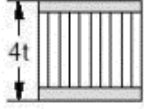
Základní metody výroby jsou:

- Ruční kladení s dodatečným vakuováním
- Infuzí
- Pomocí před-impregnovaných vláken (prepreg)
- Navíjení

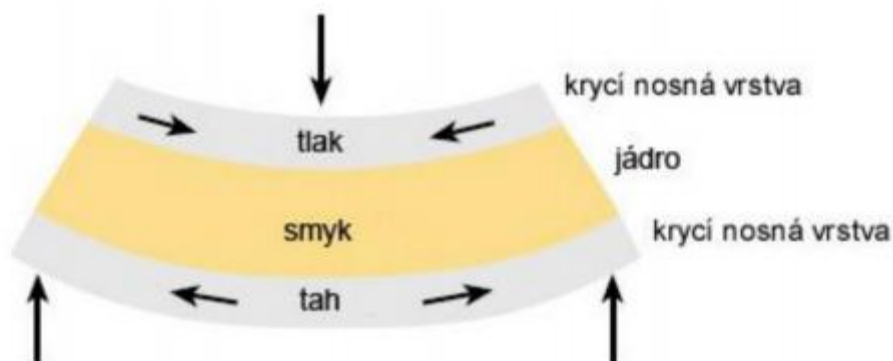
## 1.6 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

Sendvičová struktura je složena ze dvou vnějších pevných vrstev (potahů) a lehkého jádra, které jsou k sobě pevně spojeny. Tato struktura umožňuje zvýšení ohybové tuhosti při minimálním zvýšení hmotnosti (Tab. 3). S jistou nadsázkou se tato konstrukce dá přirovnat ke kovovému „I“ nosníku, protože obě konstrukce využívají principu umístění velkého množství hmoty do značné vzdálenosti od neutrální osy, resp. centra ohybu.

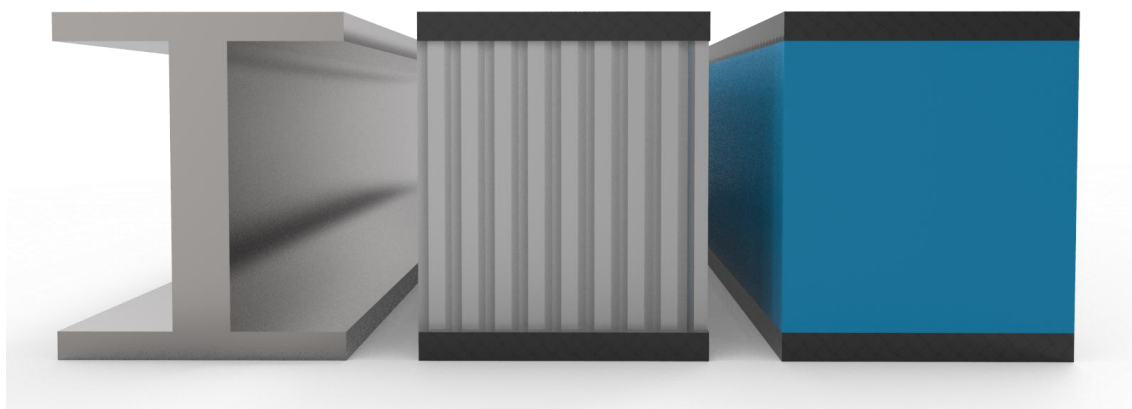
Tab. 3 Poměr zvýšení ohybové tuhosti a hmotnosti sendvičové struktury [10]

	Celistvý materiál	Síla jádra $t$	Síla jádra $3t$
			
tuhost	1,00	7,00	37,00
pevnost v ohybu	1,00	3,50	9,20
hmotnost	1,00	1,03	1,06

Princip přenášení sil sendvičem spočívá v rozkládání působící síly na tahovou a tlakovou složku působící na potah a smykovou sílu přenášenou jádrem jako na Obr. 1-13.



Obr. 1-13 Působení sil na sendvičovou konstrukci [11]



Obr. 1-12 Přirovnání sendvičového materiálu ke kovovému nosníku

#### 1.6.1 POTAHY

Sendvičové potahy bývají vyrobeny především z uhlíkových nebo skleněných kompozitů, ale dá se využít i hliníkový, duralový nebo titanový plech. Představují tuhou a pevnou část sendviče a přenášejí většinu silového působení.

#### 1.6.2 JÁDROVÉ MATERIÁLY

Jako jádrové materiály se používají hlavně voštiny a pěny nízkých hustot. Obecně mají voštiny lepší vlastnosti při stejné hustotě než pěny. Pěny mají ovšem výhodu ve snazší zpracovatelnosti a hlavně ve svých izotropních vlastnostech. Dalšími druhy jádrových materiálů mohou být různé konstrukce vyrobené pomocí 3D tisku. Ten přináší obrovský potenciál při optimalizaci tvaru přesně podle daného použití a ušetřit tak hmotnost. Mezi další materiály můžeme zařadit překližky, balsu, syntetická dřeva, 3D skelné tkaniny a jiné.

#### PĚNY

Pěnových materiálů existují velká množství. Jejich další výhodou jsou styková plocha při lepení a také poréznost. Poréznost umožňuje materiálu tlumit rázy a vibrace a styková plocha

umožňuje dokonale přilnout k potahu. Při vytvrzování sendvičové struktury s pěnou je nezbytné upravit tlakový a teplotní cyklus vzhledem k jejím vlastnostem. Vysoká teplota nebo tlak můžou způsobit implozi pěnového jádra.

### VOŠTINY

Jedná se o jádrový materiál, který je tvořen hexagony a svou podobností ke včelím plástvím dostal jméno voština. Vyrábí se z různých druhů materiálů, především z hliníkových folií a nomexových papírů. Základní parametry voštiny jsou tloušťka fólie, velikost oka a hustota.

Vlastnosti voštiny jsou ortotropní – závislé na směru. Jejich nevýhodou je také horší přilnutí k potahu, kvůli malé stykové ploše, a proto se používají speciální fóliová lepidla, která během vytvrzování zvětšují svůj objem a přilnou ke stěnám.

Hliníkové voštiny mají výborný poměr mezi mechanickými vlastnostmi a cenou. Jejich nevýhodou může být absence mechanické paměti, kdy se při zatížení se voština deformuje plasticky a zhorší se vlastnosti. Nomexové voštiny paměť mají a je s nimi snadnější práce než s voštinou hliníkovou. Také cena je podstatně vyšší. Lépe přilnou k potahu než hliník.



## 2 KONSTRUKČNÍ ČÁST - NÁVRH

Návrh konstrukce chassis je iterační proces, při kterém je nezbytné neustále hledat kompromis s potřebami ostatních částí vozu. Je potřeba dbát na pravidla, dostatečnou ergonomii pro řidiče a vytvořit rám, který má dostatečnou bezpečnost, pevnost a tuhost. Při návrhu rámu vyráběného laminací je také třeba myslet na technologii výroby, nutnou odformovatelnost a celkovou smontovatelnost.

### 2.1 KONCEPT

Z důvodu více možností konceptu rámu vozu byla zvolena kritéria, které posloužila pro rozhodování před konečným výběrem. Autor využil „rozhodovací matici“ v Tab. 4, která zahrnuje nejdůležitější faktory. Rozhodující volbou je koncept s největším bodovým hodnocením.

Tab. 4 Rozhodovací matice pro výběr konceptu

		Hmotnost	Výroba	Servisovatelnost	Náklady	Tuhost/hmotnost	Svoboda designu	Atraktivita konceptu	Estetika	Týmová zkušenost	Součet
	Koeficient hodnocení	0,8	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	
Trubkové rámy	Ocelový trubkový rám	3	8	8	8	3	3	2	2	8	21,8
	Prostorový rám z CFRP trubek	7	1	3	4	5	3	7	7	0	16,7
Monokok	Celé chassis CFRP monokok	10	5	6	4	10	8	10	10	5	30,5
	Hliníkový monokok	7	3	3	5	7	7	0	3	0	18
Hybridní rámy	Celo-trubkový rám, přední část vyztužena sendvičovými panely	4	7	7	6	4	3	2	1	8	20,6
	Přední část CFRP monokok a zadní ocelový trubkový rám	7	4	7	5	7	8	8	8	6	26,5
	Přední část CFRP monokok a zadní CFRP trubkový rám	8	1	2	4	8	8	10	10	3	22,1

Z výsledků vyplývá, že nejlepším řešením je využití CFRP monokoku na celém vozidle včetně zadní části. Tento koncept byl v počáteční fázi rozvíjen, ale během prvních iteračních pokusů se zjistilo, že současná zástavba turbodmychadla a mezichladiče neumožňuje tento koncept realizovat. Pokud by se do budoucích let zástavba změnila, ať změnou konceptu motoru nebo jeho pootočením, doporučoval by autor tento koncept, pokud by bylo zajištěno dostatečné chlazení pohonné jednotky.

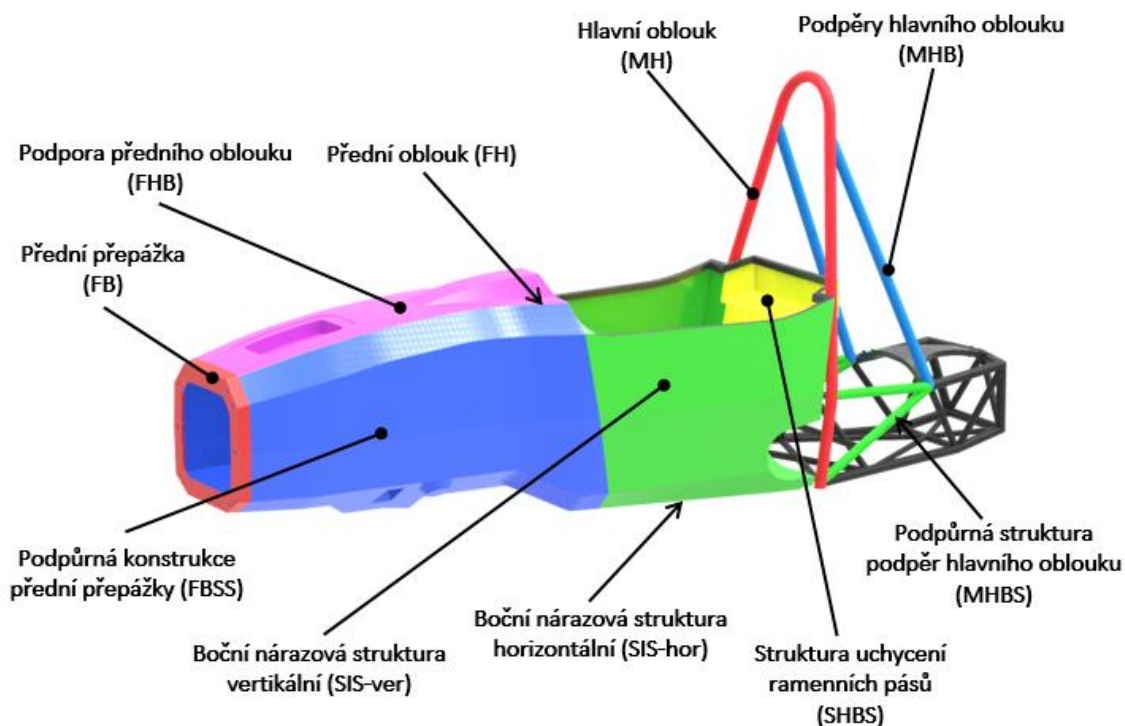
Druhým a finálním řešením je tedy CFRP monokok v přední části a ocelový trubkový rám v zadní části. Tento koncept byl v týmu využit i na posledním monopostu a osvědčil se svou



spolehlivostí a tuhostí. Poskytuje zároveň dostatek prostoru pro manipulaci s motorem, aniž by se vytahoval mimo vůz. Díky využití pokročilejších technologií výroby se nabízí i dostatečná možnost odlehčení.

### 2.1.1 POPIS KONSTRUKCE

Hybridní rám se skládá ze dvou částí. Z tzv. primární struktury a ostatních částí, jak popisují pravidla soutěže [12]. Všechny části rámu, které jsou součástí primární struktury mají pevně stanovenou bezpečnost použitím profilů předepsaných pravidly nebo konstrukcí, která je těmto hodnotám ekvivalentní. Všechny alternativní konstrukce musejí projít zátěžovými zkouškami. Na Obr. 2-1 jsou zobrazeny všechny důležité části primární struktury.



Obr. 2-1 Popis jednotlivých primárních částí hybridní konstrukce

### 2.1.2 STANOVENÉ CÍLE

Se zvoleným konceptem se upřesnily cíle, kterých se autor držel při návrhu, aby se kvalita vozu opět zvýšila. Tři nejdůležitější parametry jsou v tabulce 5.

Tab. 5 Zadané cíle

Parametr	Dragon 7	Cíle Dragon 8
Hmotnost [kg]	31,7	< 28
Torzní tuhost [Nm/°]	1840	> 2000
Výška těžiště [mm]	280	$\Delta \leq 0$

Po zhodnocení předchozího rámu byla stanovena dosažitelná hmotnost celkového rámu se všemi držáčky, včetně laku a komaxitu na trubkové části na 28kg.

Torzní tuhost na posledním rámu dosáhla hodnoty 1840 Nm/°. V letošní sezóně je cílem minimální torzní tuhost na 2000 Nm/°. Dosáhnout by se toho mělo díky zmenšení volného prostoru v oblasti vstupu do vozidla, která je kvůli otevřené horní straně nejméně tuhá z celého vozu. Jedním z cílů je také zpřesnění tohoto měření a určení tuhostí jednotlivých částí vozu. K tomuto měření autor použije kromě budíkových úchylkoměrů i fotogrammetrický systém TRITOP.

Posledním cílem je zachování stávající výšky těžiště nebo její snížení.

## 2.2 3D MODEL

Pro návrh vozu byl využit CAD program Creo Parametric 3.0. Modelování usnadnilo spoustu implementovaných nástrojů pro konstrukci. Návrh trubkové části probíhal vytvořením skeletonu a pomocí nástroje framework se přidaly profily a jejich vzájemné ořezy. Program zároveň obsahuje nástroje pro simulaci a bylo možné provádět analýzy souběžně s konstrukcí v jednom prostředí. Geometrie plechových držáků a jejich ohyby se snadno modelovaly v prostředí sheetmetal. Pro návrh kompozitních dílů se zase využilo nástrojů pro plošné modelování. V tomto prostředí byla vytvořena celá sestava vozu se všemi komponenty.

Prvotní návrh spočíval ve vytvoření iterace skeletonu trubkové části kolem motoru a turbodmychadla. Tyto dvě části pohonného systému sloužily jako pevné body vzhledem k zachování jejich pozice jako v předchozím vozidle. Současně došlo k výraznější úpravě hlavního oblouku, který podle pravidel musí být ohýbán z jednoho kusu ocelového profilu. Vzhledem k nesériové výrobě je obtížné nastavit stroj na přesný ohyb a i přes několik ohybů na odladění stroje dochází k nepřesnostem na ohnutých úhlech. Oproti loňskému roku se proto zjednodušila geometrie hlavního oblouku z pěti úhlů na pouhé tři, aby se snížila nepřesnost a dodatečné dílenské ohýbání do přípravku.

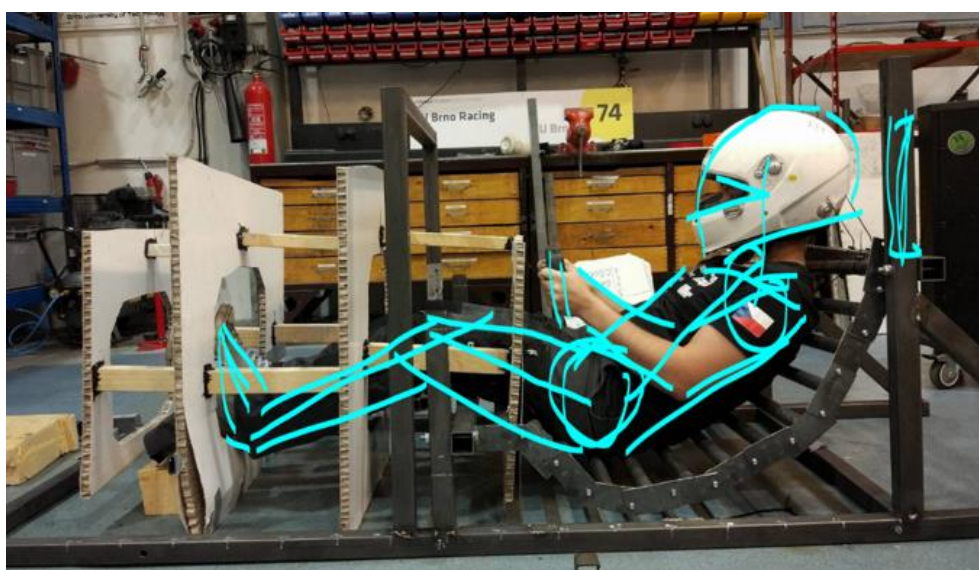


Obr. 2-2 Porovnání oblouku Dragona 7 (černý) a Dragona 8 (červený)

Stanovila se jízdní výška vozu a do modelu se přidala první iterace kinematických bodů. Dostatek referencí umožnil vznik základní verze monokoku, která dosedala k trubkové části přes hlavní oblouk a zespodu byla omezená jízdní výškou s odsazením pro podlahu vozu. Vytvořený model usiloval o aerodynamický tvar, aby nevznikal zbytečný odpor vzduchu.

## 2.3 ERGONOMIE

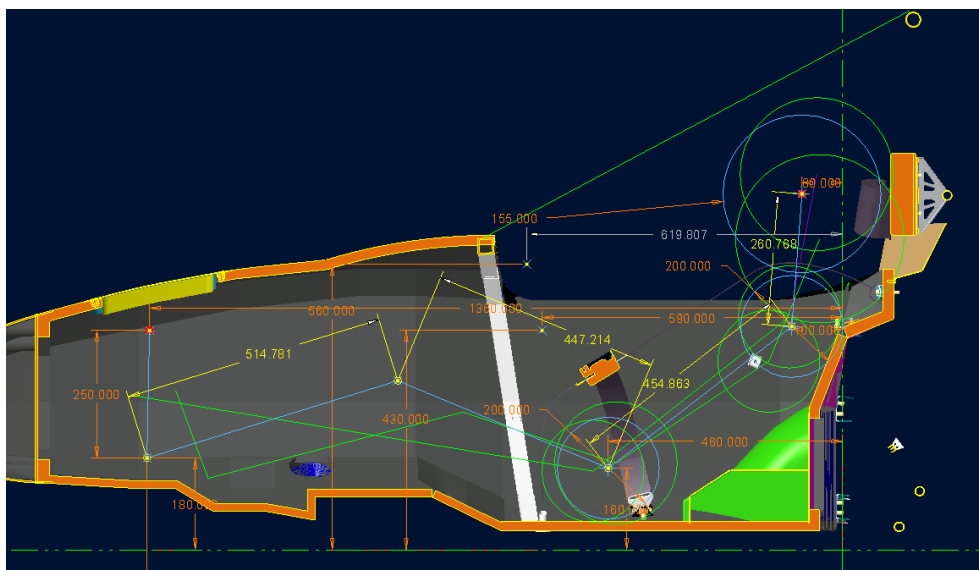
I když vytvoříte nejrychlejší auto, tak nemůžete vyhrát, pokud se řidič necítí pohodlně a nemá snadné ovládání. S tímto mottem se vytvořil polohovatelný ergonomický přípravek, který odpovídal aktuálnímu návrhu monokoku. Řidič, který představuje celou čtvrtinu hmotnosti vozu má velký vliv na rozložení hmotnosti a výšku těžiště. Proto řídí v ležící poloze s tělem co nejnižší, ale zároveň s dostatečným výhledem na trať.



Obr. 2-3 Usazení řidiče do přípravku na ergonomické měření

Na základě rozměrových měření řidičů v požadované poloze se vytvořil jejich skeleton (Obr. 2-5) a provedly potřebné úpravy tvaru monokoku. Pomocí tohoto měření se podařilo určit pozici dalších komponent jako volantu, opěrky hlavy, umístění pásů nebo pedálů. Pro kontrolu výhledu a dostatečného prostoru pro nohy se vytvořilo několik průřezů monokokem z kartonových desek.

Posledním využitím tohoto přípravku byla výroba sedačky na míru. Řidiči se doslova zalili montážní pěnou s vysokou expanzí, která po vytvrzení kopírovala řidičova záda. K naskenování pěny se použil 3D skener ATOS Compact a na základě naskenovaných dat vznikl finální model sedačky (Obr. 2-4).



*Obr. 2-5 Skeleton řidiče v bokorysu*

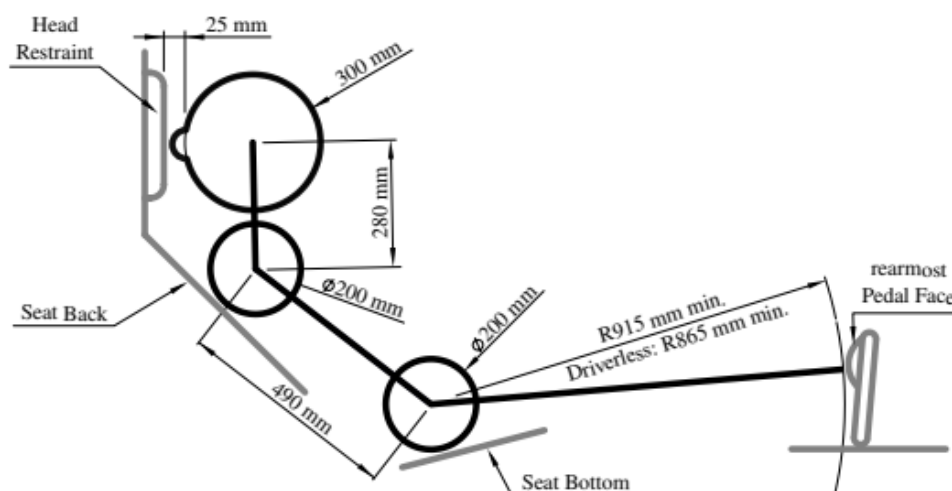


*Obr. 2-4 Finální model sedačky*

## 2.4 PRAVIDLA OMEZUJÍCÍ GEOMETRII RÁMU

### 2.4.1 PERCY

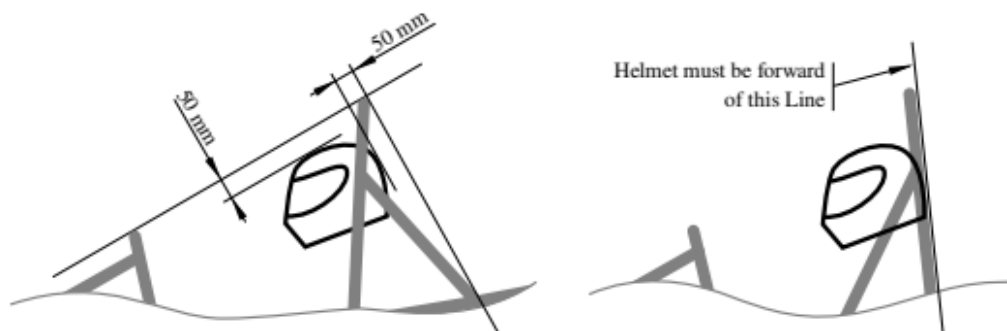
Pravidla vyžadují, aby každý vůz byl schopen ubytovat kromě vlastních řidičů i řidiče, který představuje 95 % muže. Tato šablona tzv. Percyho je znázorněna na Obr. 2-6 a přesněji ji definují pravidla [12].



Obr. 2-6 Šablona 95 % muže [12]

#### 2.4.2 BEZPEČNOST PŘI PŘEVRÁCENÍ

V případě převrácení monopostu nesmí dojít ke kontaktu řidičovy helmy s vozovkou. Proto je nezbytné zaručit, že při spojení předního a hlavního oblouku rovnou čarou je mezi řidičovou helmou a touto linkou dostatečná vůle. Pravidlo se vztahuje zároveň i na šablonu Percyho. Toto pravidlo je znázorněno na Obr. 2-7. [12]



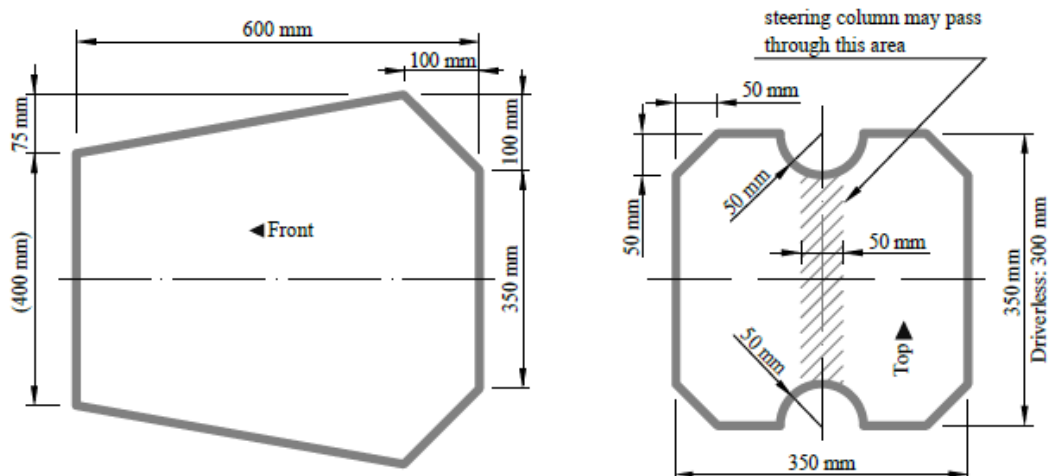
Obr. 2-7 Znázornění pravidla bezpečnosti při převrácení [12]

#### 2.4.3 VOLNÉ PROSTORY PRO RYCHLÉ OPUŠTĚNÍ VOZU

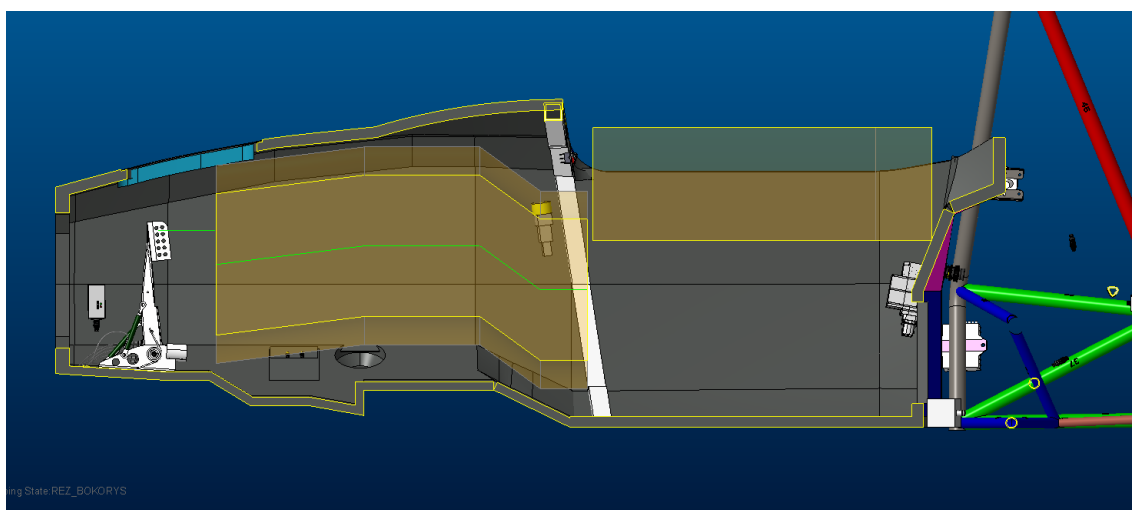
Kromě převrácení může nastat i jiná nouzová situace, kdy je nutné velmi rychle opustit vozidlo. V takovém případě by měl být schopen řidič vyskočit do 5 vteřin ven z vozu. Proto se klade důraz na dostatečný prostor uvnitř vozu a jsou předepsány dvě prostorová tělesa která to mají zaručit.

První šablonou je otevření kokpitu (Obr. 2-9, Obr. 2-8). Ve výšce 320 mm nad nejnižším vnitřním bodem monokoku začíná šablona a pokračuje směrem nahoru do výšky nezbytně nutné. Při ověřování dostatečného prostoru je možno touto šablonou pohybovat v horizontálním směru.

Druhou je šablona otevřeného prostoru pro nohy řidiče. Začíná 100 mm před čelem pedálu a končí za předním obloukem. Šablonou lze pohybovat ve vertikálním směru. [12]



Obr. 2-9 Šablony pro rychlé opuštění vozu, vpravo pro vstup do kokpitu a vlevo prostor pro nohy



Obr. 2-8 Umístění šablon na vozidle Dragon 8

## 2.5 PŘEDNÍ OBLOUK

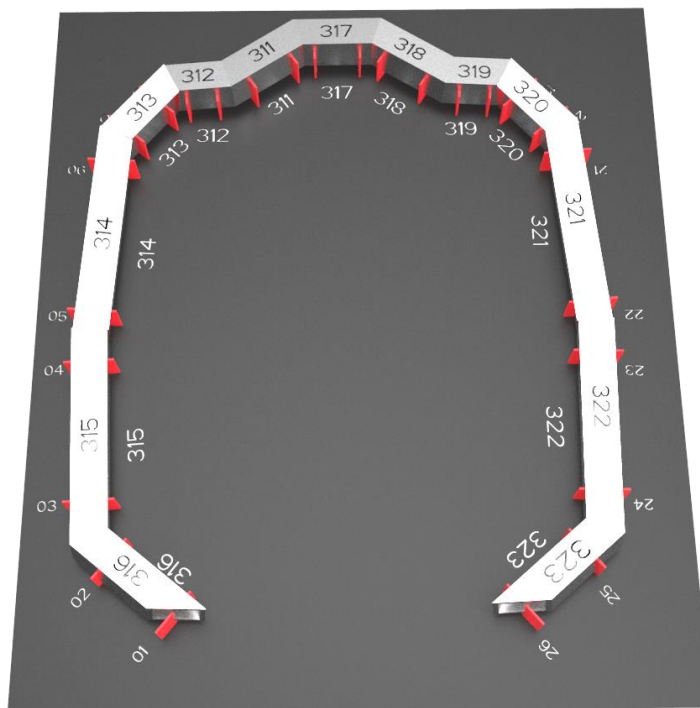
Přední bezpečnostní oblouk je součástí monokoku a opisuje jeho tvar. Pravidla předepisují použití ocelového nebo hliníkového profilu. V případě, že se jedná o hliníkový profil, tak jeho tuhost a pevnost musí být ekvivalentní nebo větší než ocelového profilu předepsaného pravidly. [12]

Z důvodu nepřesností při výrobě ohybem se zvolil hliníkový svařovaný oblouk. Protože se v české republice standardně neprodává žádný čtvercový profil s požadovanými rozměry nebo dostatečnými vlastnostmi po svaření, musel se objednat z Velké Británie. Jedná se o slitinu EN AW 6082 T6, které se po náležité tepelné úpravě vracejí původní vlastnosti.

Pro přesné svaření se vyrobil přípravek fixující oblouk do správného tvaru. Musel vzniknout i z důvodu, že oblouk nemohl být v ideální pozici z důvodu kolize s držákem ramene. Ideální pozici se myslí uložení, kde by měly všechny stěny jednotlivých kousků společnou rovinu. Aby



se oblouk vyhnul kolizi, musel se nahnout spodní částí dozadu a jednotlivé stěny jsou vůči sobě mírně pootočené, aby lícovaly se stěnou monokoku.



*Obr. 2-10 Přípravek na svaření hliníkového předního oblouku*

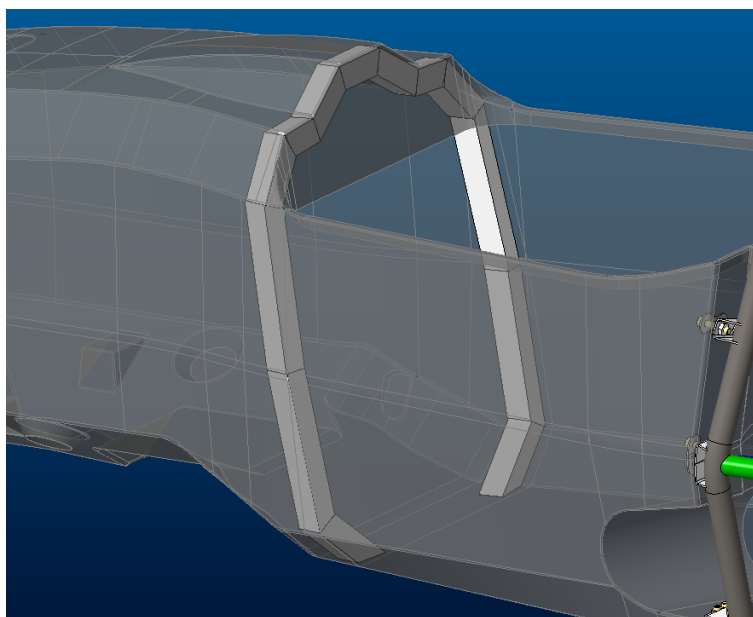
Přípravku bylo zapotřebí i vzhledem k velmi přesnému umístění oblouku do vytvrzeného vnějšího potahu. Aby šel oblouk vsunout a nalepit byl vyroben s milimetrovým odsazením od potahu a jeho stěny byly při lepení natlačeny na potahy. (Obr. 2-11)

Přední oblouk není na rozdíl od hlavního k monokoku připevněn mechanicky, ale je do monokoku vlepen. Pravidla vyžadují, aby spojení vydrželo 120 kN ve všech směrech. Proto se k lepení využilo epoxidové lepidlo Loctite 9466, které má při lepení karbonových potahů a hliníku smykovou pevnost cca 12 MPa.

Výpočtem se dokázalo, že lepený spoj je dostatečný ve směrech osy x a osy y.

$$S_{min} = \frac{F}{\tau} = \frac{120}{12} = 10\,000\,mm^2 \quad (1)$$

, kde F je síla, kterou musí spoj vydržet,  $S_{min}$  je minimální plocha lepeného spoje a  $\tau$  je smyková pevnost lepidla. Vzhledem k velikosti lepené plochy 37 000 mm<sup>2</sup> je bezpečnost 3,7 v daných směrech.



Obr. 2-11 Umístění předního oblouku na vnější potah

Ve směru osy y byl důkaz založen na zatížení kolmo na stěnu potahu monokoku. Vzorec pro výpočet síly, kterou potah udrží byl použit vzorec

$$F_{max} = t_{potahu} \cdot o_{dotyku} \cdot \tau_{shear} = 1,38 \cdot 1228 \cdot 138,3 = 234 \text{ kN} \quad (2)$$

, kde  $F_{max}$  je síla kterou vydrží potah před uštížením,  $t_{potahu}$  je tloušťka potahu v místě oblouku,  $o_{dotyku}$  je obvod opěrné plochy na které by se potah uštíhl a  $\tau$  je smyková pevnost potahu získaná ze zkoušky. Vzhledem k minimální přípustné síle je bezpečnost v tomto směru asi 1,95.

## 2.6 VÝŘEZ TURBODMYCHADLA

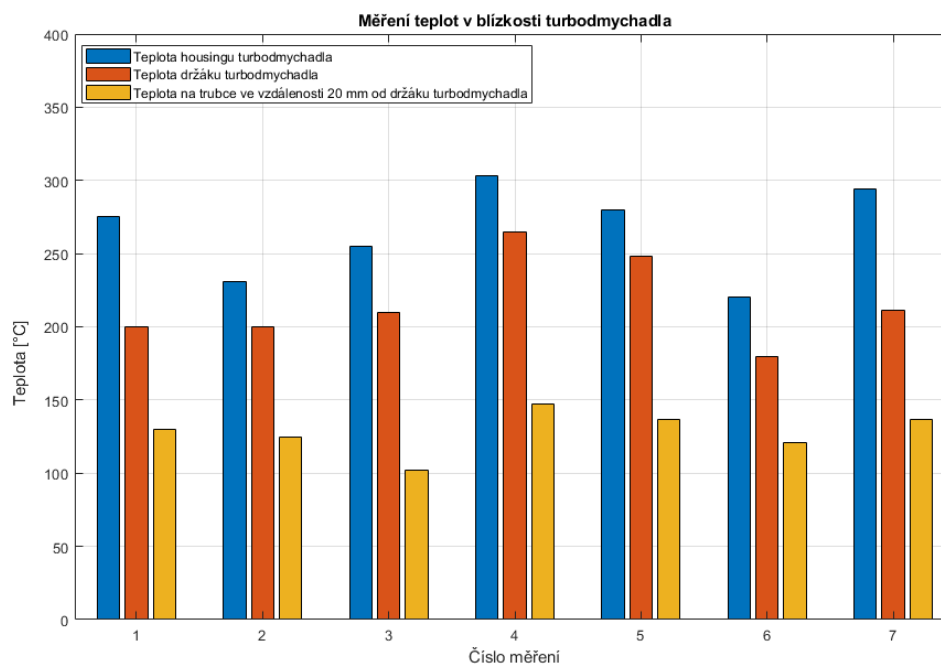
Jedním z problémů, které bylo nutno vyřešit je tepelná odolnost kompozitních materiálů za zvýšené teploty. Vzhledem k zachování pozice turbodmychadla na nepříliš vhodném místě vedle hlavního oblouku se tato situace v loňském roce řešila ohnutím spodní části hlavního oblouku dopředu a přidáním trubek, zatímco zadní část monokoku měla úkos (Obr. 2-12). V letošním roce se pro turbodmychadlo a výfukový systém udělal výřez s dostatečnou mezerou mezi turbodmychadlem a monokokem. (Obr. 2-13)

Během jízdy dochází k dostatečnému obtékání a chlazení této části monokoku, ovšem v případě zastavení dochází k sálání tepla bez chlazení obtékajícím vzduchem. Tento problém řeší nalepení zlaté folie Zircoflex gold, která odráží až 98 % radiálního tepla. [13]

Turbodmychadlo je umístěno přes držák na hlavním oblouku a ten je zase připevněn k monokoku. Dochází zde tedy zároveň k vedení tepla přes trubku a držáky. Vzhledem k významnosti problému proběhlo na posledním vozidle D7 měření teplot během testovacích jízd v oblasti turbodmychadla, z něhož vyplývá, že by se vedením přes hlavní oblouk nemělo dostat příliš velké teplo až k samotnému monokoku.

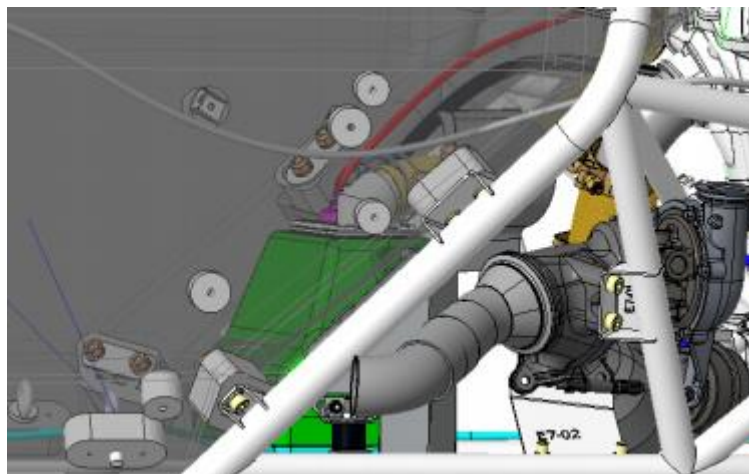
Původně se také uvažovalo o využití kyan-esterové pryskyřice v této oblasti, která má teplotu skelného přechodu až do 360°C, ale vzhledem k výsledkům testování a ceně materiálu se od tohoto nápadu upustilo.



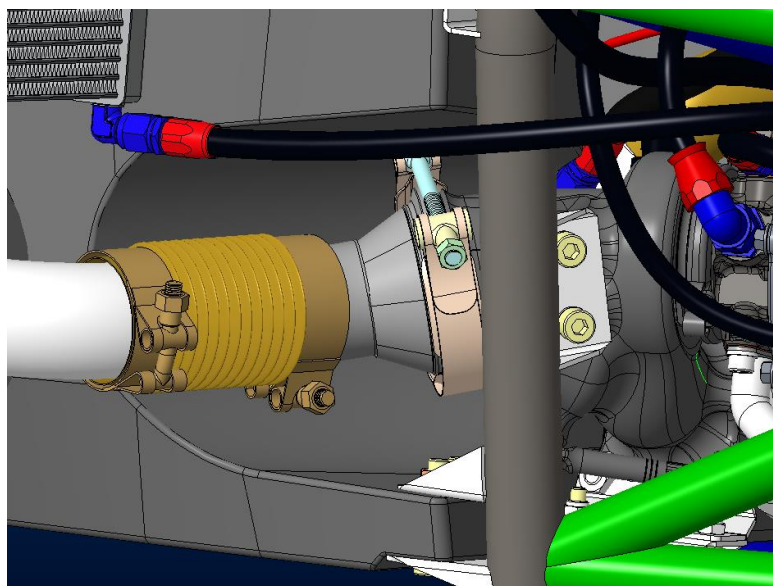


*Graf 1 Teplotní měření v oblasti turbodmychadla*

Monokok vydrží teploty kolem 130°C. Pro jistotu však byly do oblasti přidány dva kalibrované teplotní senzory napojené na datalogger a je možné teplotu monitorovat během jízdy nebo zastavení vozu v reálném čase. V případě prudkého nárustu je možné tento problém řešit dříve, než by došlo k vážnějšímu selhání.



*Obr. 2-12 Řešení situace na voze Dragon 7 [14]*



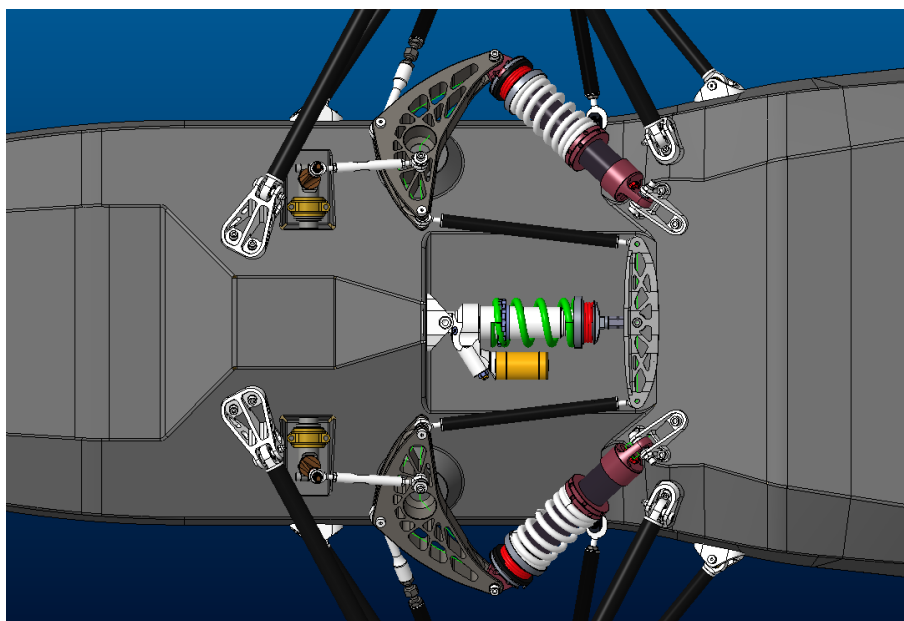
Obr. 2-13 Výřez turbodmychadla na vozidle Dragon 8

## 2.7 TŘETÍ JÍZDNÍ TLUMIČ NA PŘEDNÍ NÁPRAVĚ

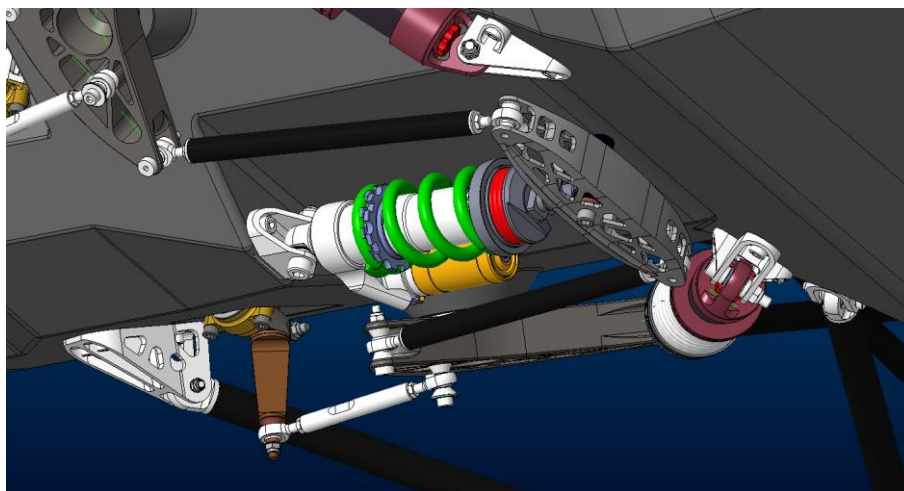
Zásadním zásahem do designu monokoku bylo umístění třetích jízdních tlumičů. Znamenalo to nechat volný prostor pod nohama řidiče a upravit geometrii, aby držáky do monokoku přenášely pouze tlakové a tahové síly. To přineslo další problém s uchycením stabilizátorů. Jediným možným řešením bylo vytvoření výřezů, do kterých se umístily držáky. Tyto geometrické úpravy značně zkomplikovaly proces výroby vozu z důvodu složité geometrie pro výrobu laminováním na těchto místech. (Obr. 2-14)

Pro konstrukci odpružení je využito systému pull-rod. Znamená to, že vahadlo je umístěné na boku spodní strany monokoku a tlumiče směřují směrem vzad. U tohoto typu je nesmírně důležité, aby vahadlo, táhlo a tlumič byly v jedné rovině. V opačném případě by se do této prutové soustavy dostal ohybový moment. Vahadlo je uloženo na čepu v monokoku, kolem kterého se otáčí. Tento čep je zalisován do insertu, který se nachází ve výstupku rovnoběžném s rovinou odpružení – tedy vahadlem, táhlem a tlumičem. Jedná se o stejný koncept, který se použil v loňském roce. [14]

Aby nedošlo v případě selhání zavěšení k dosednutí celé váhy monokoku na jízdní tlumiče, byl vytvořen ostrůvek, který v případě pádu zabrání jejich zničení. (Obr. 2-15)



*Obr. 2-14 Pohled na uložení tlumičů přední nápravy*



*Obr. 2-15 Umístění výstupku pro držák třetího tlumiče*

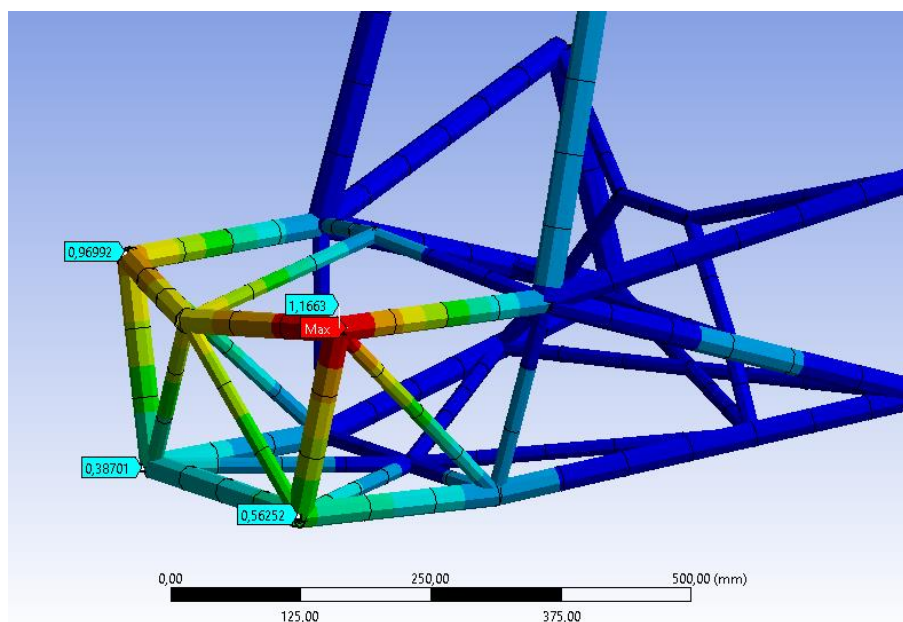
## 2.8 TŘETÍ JÍZDNÍ TLUMIČ NA ZADNÍ NÁPRAVĚ

Oproti poslední sezoně se na zadní nápravě změnil systém pull-rod na push-rod. Tlumiče a vahadla jsou umístěna na horní straně rámu a byl přidán třetí jízdní tlumič (Obr. 2-17). Díky tenzometrickým měřením z předchozích let jsme byli schopni určit zatížení jednotlivých ramen a adaptovat je na novou kinematiku. Tyto hodnoty zatížení v největších zátěžných stavech (zatačení, brždění, výmol) nám slouží pro simulaci tuhosti. Hodnoty jsou v Tab. 6.

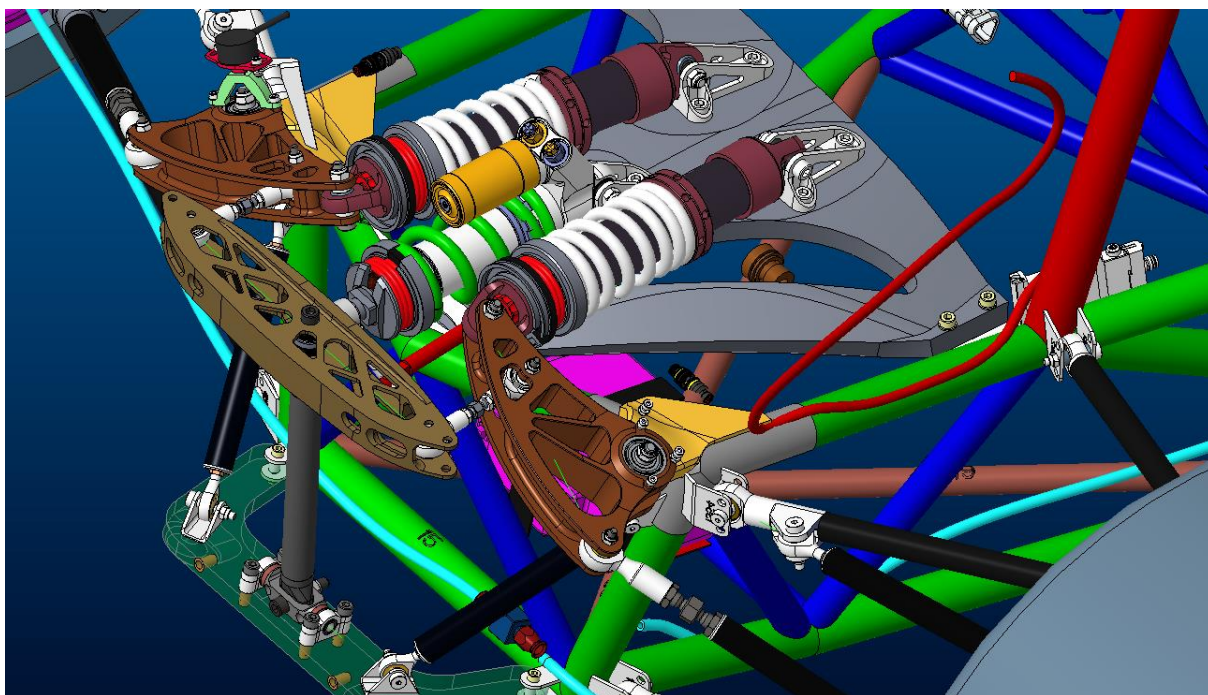
Tab. 6 Síly působící na zadní nápravu v extrémních situacích

Zadní náprava			
levá strana		pravá strana	
Síly při zatáčení [N]			
Dolní přední rameno	74	Dolní přední	-1942
Horní přední rameno	-42	Horní přední	574
Pull-rod	54	Pull-rod	-3782
Spodní zadní	105	Spodní zadní	-104
Horní zadní	-34	Horní zadní	861
Tierod	-2	Tierod	168
Síly při brždění [N]			
Dolní přední	3646	Dolní přední	3646
Horní přední	-1920	Horní přední	-1920
Pull-rod	-2957	Pull-rod	-2957
Spodní zadní	137	Spodní zadní	137
Horní zadní	1983	Horní zadní	1983
Tierod	-161	Tierod	-161

Simulace ukázaly, že síly od nápravy způsobovaly příliš velké deformace z důvodu nedostatečné tuhosti konce rámu, a proto byl přidán vyztužující prvek – kalhotky z uhlíkového kompozitu (Obr. 2-17). Tyto kalhotky zároveň slouží k uchycení jízdních tlumičů zadní nápravy.



Obr. 2-16 Deformace zadní části rámu bez vyztužujícího prvku



Obr. 2-17 Umístění vahadel, třetích tlumičů a stabilizátorů na zadní nápravě, vyztužení rámu kalhotkami

## 2.9 NÁVRH PANELŮ

Pro správný návrh panelu monokoku je zapotřebí několika vstupních hodnot. Jsou to mechanické vlastnosti voštiny, které dodává výrobce v technickém listu. V našem případě se jedná o hliníkové voštiny Duracore II – 5056 od firmy Alcore Brigantine.

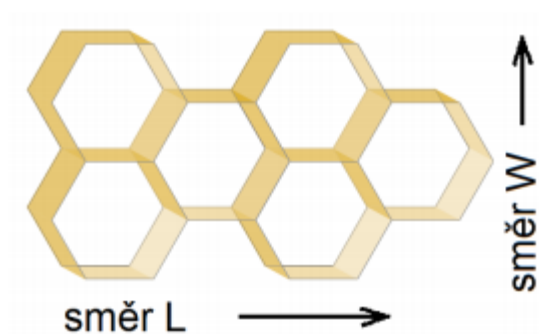
Tab. 7 Materiálové vlastnosti hliníkové voštiny Duracore II

hustota	velikost buňky	tloušťka folie	tlaková pevnost (stabilizovaná)	pevnost v drcení	Smyková pevnost		Modul ve smyku	
					L	W	L	W
[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[ym]	[MPa]	[MPa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
50	3,2	18	2,45	1,24	1,76	1,1	221	110

U vlastností vytvrzeného kompozitu je potřeba znát Youngův modul pružnosti v tahu v podélném směru vlákna  $E_1$ , Youngův modul pružnosti v tahu v příčném směru  $E_2$ , modul pružnosti ve smyku  $G_{12}$ , Poissonovo číslo  $\mu$ , tloušťku vrstvy  $t$  a orientaci vůči definovanému směru  $\theta$ . V letošním roce používáme uhlíková vlákna T800S s gramáží 200 g/m<sup>2</sup> od firmy Torayca před-impregnované pryskyřicí DT120 od firmy Deltatech.

Některé vlastnosti se dají dopočítat na základě hodnot v materiálových listech vlákna a pryskyřice.





Obr. 2-18 Vyznačení směru voštin [17]

Modul pružnosti v podélném směru můžeme spočítat pomocí

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (3)$$

, kde index  $f$  značí, že se jedná o hodnotu vlákna (fibre) a index  $m$  o hodnotu matrice. Pokud směr vláken není rovnoběžný se zatížením potom platí pro  $E_2$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (4)$$

Pro modul pružnosti ve smyku  $G_{12}$  je analogický vztah ke vztahu (4)

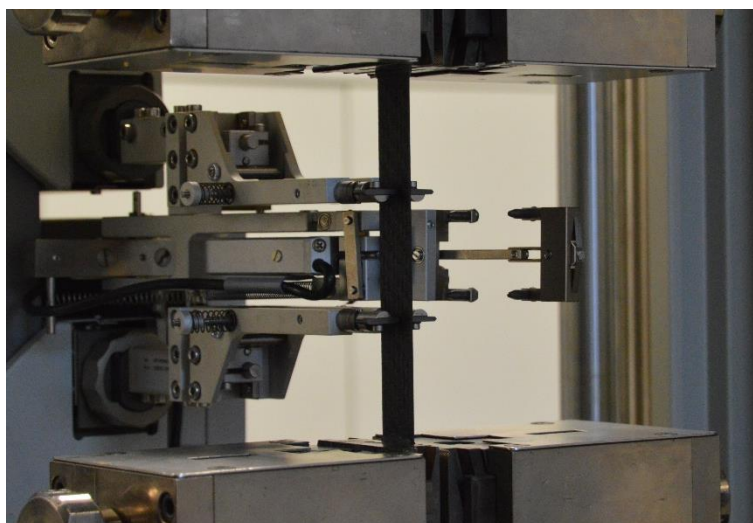
$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad (5)$$

Vztah pro Poissonovo číslo

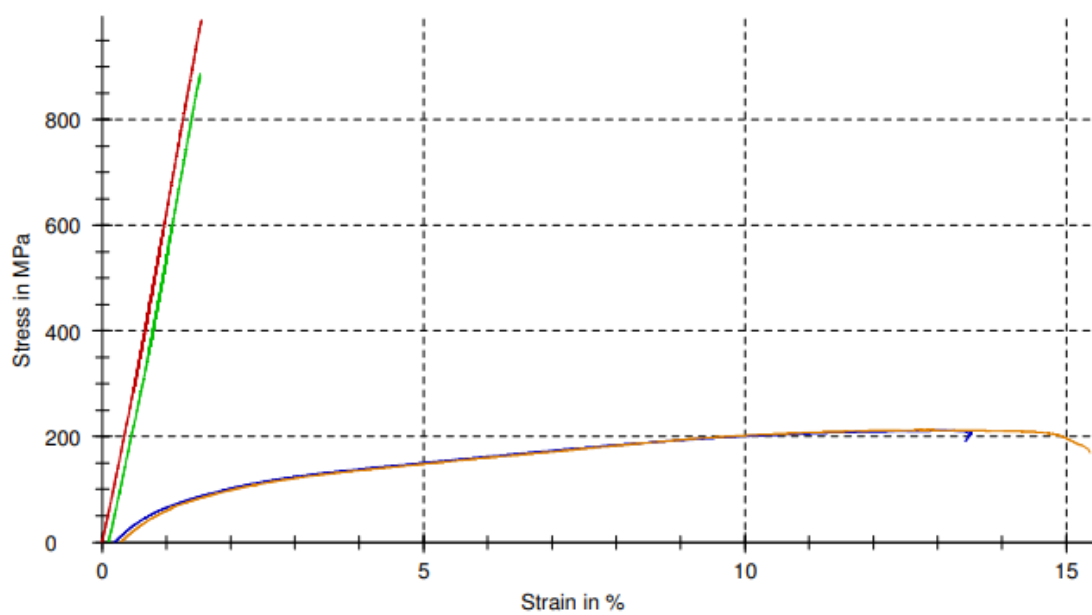
$$\mu_{12} = V_f \mu_f + V_m \mu_m \quad (6)$$

Pro jistotu se tyto spočítané vlastnosti ověřily i měřením na tahové zkoušce podle americké normy ASMT D3039. Vzorky byly nachystány jak popisuje norma a vyřezány vodním paprskem, aby nedošlo k teplotnímu ovlivnění vzorku.

Měření proběhlo pouze v tahu z důvodu náročné přípravy vzorků, přípravku a upínání pro zkoušky tlakem. Z tohoto měření se nám podařilo získat vlastnosti  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$  až na Poissonovo číslo. Tato hodnota se u štíhlých vzorků velice špatně měří z důvodu velice malé deformace v příčném směru. V Graf 2 Průběh zkoušky tahem a v tabulce 8 jsou důležité výsledky z této zkoušky.



Obr. 2-19 Měření mechanických vlastností kompozitu



Graf 2 Průběh zkoušky tahem

Tab. 8 Výsledky testu materiálových vlastností

Výsledky testu materiálových vlastností		
$E_1$	$E_2$	$G_{12}$
71 GPa	71 GPa	3,5 GPa

Výsledné mechanické vlastnosti vrstvy kompozitu jsou

Tab. 9 Vlastnosti vrstvy laminátu použité pro výpočet

Modul pružnosti L	$E_L = E_1$	[MPa]	71 500
Modul pružnosti T	$E_T = E_2$	[MPa]	71 500
Modul ve smyku	$G_{12}$	[MPa]	3 500
Poissonovo číslo	$\mu_{12}$	[-]	0,037
Podélná pevnost v tahu	$\sigma_{tL}$	[MPa]	1 200
Podélná pevnost v tlaku	$\sigma_{dL}$	[MPa]	650
Příčná pevnost v tahu	$\sigma_{tT}$	[MPa]	1 200
Příčná pevnost v tlaku	$\sigma_{dT}$	[MPa]	650
Smyková pevnost	$\gamma_{TL}$	[MPa]	211
Tloušťka	$t$	[mm]	0,23
Hustota	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1460
Plošná hmotnost	$m_p$	[g/m <sup>2</sup> ]	325

Tyto vlastnosti se následně dají použít pro výpočet v MKP softwaru nebo analyticky pomocí klasické laminátové teorie. Autor zvolil druhou metodu pomocí excelovské dokumentu, který vytvořil v přechodných letech kolega Ing. Tomáš Židek [15]. Výhodou je vytvořená materiálová databáze, snadná editaci vrstev potahu a okamžitý přepočítání oproti složitějšímu nastavování v MKP. V loňském roce se vypočtené vlastnosti pomocí tohoto dokumentu oproti reálnému měření rozcházeli pouze o 12%.

Na základě porovnání navržené konstrukce s ocelovým rámem předepsaným pravidly vznikly tyto návrhy panelů:

Tab. 10 Navrhovaná skladba jednotlivých panelů

Panel	Skladba
FB	[0/45/0/45/0/jádro_16_mm]s
FHB	[0/45/0/45/0/45/0/45/0/45/0/jádro_20_mm/45/0/45/0/45/0/45/0]
FBSS	[0/45/0/45/0/jádro_18_mm]s
SIS-ver	[0/45/0/0/45/0/jádro_20_mm]s
SIS-hor	[0/45/0/0/45/0/jádro_6_mm]s
SHBS	[0/45/0/0/45/0/jádro_16_mm]s

## 2.10 MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ

Každý z navržených panelů musí být podroben mechanickým zkouškám, ze kterých se derivují hodnoty do dokumentu SES [12], který slouží ke srovnání navržené kompozitní konstrukce s minimální požadavky na trubkový rám.

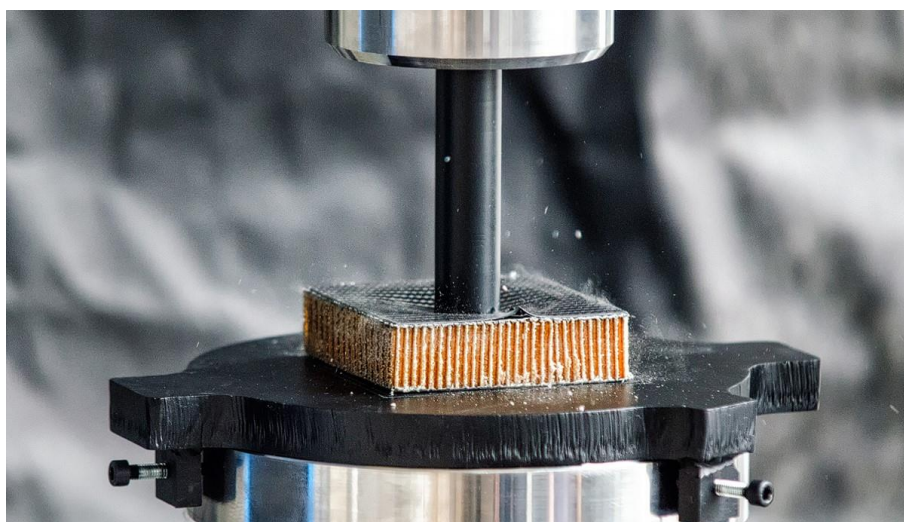


První zkouškou je tříbodý ohyb, ze kterého se získá ohybová tuhost  $E$  a pevnost panelu v ohybu  $\sigma_{\text{uts}}$ , případně i absorbovaná energie u boční nárazové struktury. Tato zkouška má přesně definovaný průběh. Přípravek se skládá ze tří válců. Dva slouží jako podpory v rozestupu 400 mm a mají průměr 50 mm. Zatěžující válec má průměr 100 mm a nachází se v ose přípravku. Vzorek musí mít přesně 500 x 275 mm a nesmí mít vyztužené hrany, tj. musí být vidět jádro.



*Obr. 2-20 Průběh zkoušky ohybem*

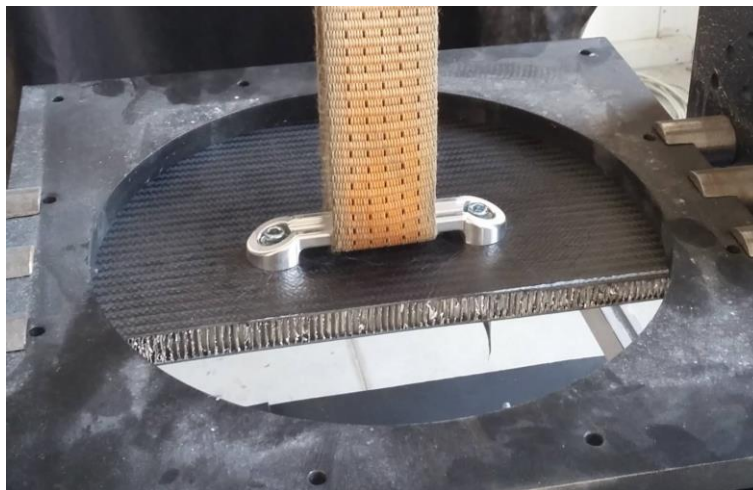
Další zkouška je průrazová, při které se zjišťuje stříhová pevnost  $\sigma_{\text{shear}}$  jednotlivých potahů. Na vzorek o minimálním rozměru 100 x 100 mm se tlačí ocelovým razníkem o průměru 25 mm, dokud se neprotihnou oba potahy.



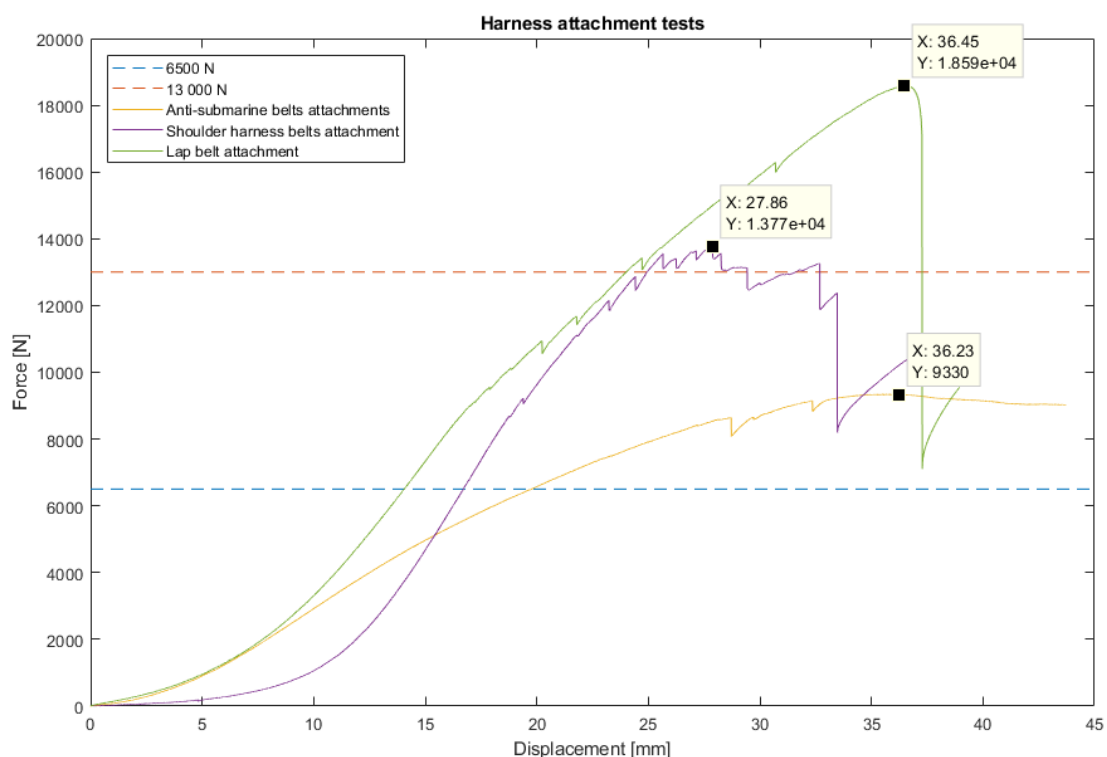
*Obr. 2-21 Průběh průrazové zkoušky*

Povinné je testování panelů s držáky pásů, které musí vydržet hodnoty předepsané pravidly. Pro držáky ramenních a bočních pásů se jedná o hodnotu 13 kN. Pro pásy „kuláky“ se jedná o

6,5 kN. Pokud se držák blíží hraně monokoku tak tato vzdálenost musí být i na vzorku a musí být vidět jádro, tj hrana nemůže být přelaminovaná stejně jako u vzorků na ohyb. (Obr. 2-22) Výsledky ze zkoušky jsou zobrazeny v Graf 3.



Obr. 2-22 Testovací vzorek panelu držícího ramenní pás



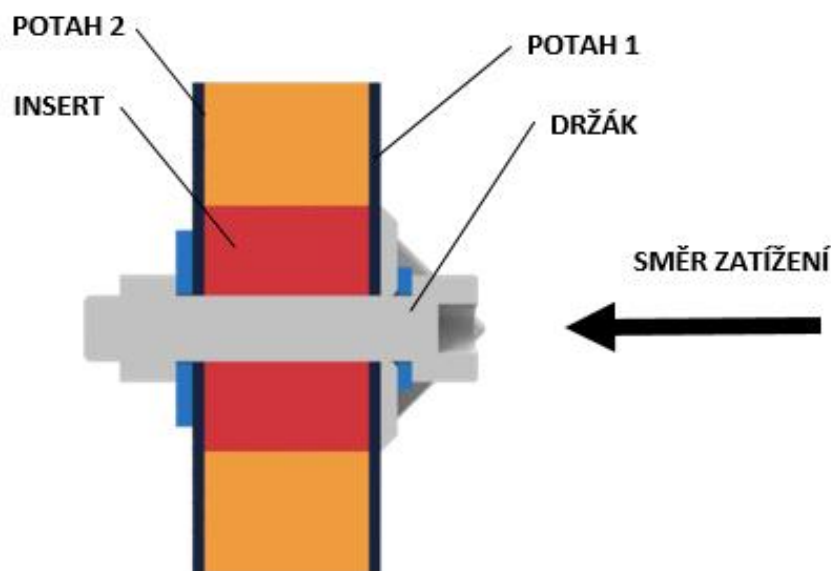
Graf 3 Výsledky ze zátěžové zkoušky panelů držících pásy

## 2.11 SPOJENÍ MONOKOKU A TRUBKOVÉHO RÁMU

Pro spojení monokoku a hlavního oblouku vyžadují pravidla minimálně čtyři držáky, z nichž každý musí unést 30 kN ve všech směrech. Dva musejí být v nejnižší části vozu a dva ve výšce kolem 300 mm. K lokálnímu vyztužení slouží tzv. inserty což jsou tuhé náhrady jádrového materiálu (Obr. 2-23). Těchto výztuží je potřeba, protože sendvičová konstrukce si poradí s plošným zatížením, ale při bodovém může dojít k selhání nebo ztrátě stability. Pro výpočet slouží následující vzorec.

$$F = (t_{\text{potahu1}} * o_{\text{držáku}}) + (t_{\text{potahu2}} * o_{\text{insertu}}) * \tau_{\text{potahu}} \quad (7)$$

Kde  $F$  je síla, kterou potahy unesou,  $t_{\text{potahu1}}$  je tloušťka potahu 1,  $o_{\text{držáku}}$  je obvod držáku na kterém se stříhne potah a u  $t_{\text{potahu2}}$  je tloušťka potahu 2 a  $o_{\text{insertu}}$  je obvod insertu.  $\tau_{\text{potahu}}$  je hodnota stříhového pevnosti derivovaná ze zkoušky průrazem.



Obr. 2-23 Konstrukce insertu v řezu

V dokumentu SES je celý výpočet už přednastaven a stačí zadat pouze hodnoty derivované ze zkoušek a skutečné hodnoty držáku a insertu.

Pro návrh spoje, který není průchozí a drží ho pouze insert lze použít vzorec.

$$F = t_{\text{potahu}} * o_{\text{insert}} * \tau_{\text{potahu}} \quad (8)$$

kde  $F$  je působící síla,  $t$  je tloušťka potahu,  $o$  je obvod insertu a  $\tau$  je stříhová pevnost potahu.

**Main Hoop Attachments**No. of attachment points per side **3**

B/

	Attachment 1		Attachment 2		Attachment 3		Attachment 4	
Attachment Status	PASS		PASS		PASS		N/A	
Fastener dia., mm	8	PASS	8	PASS	8	PASS	8	PASS
No. of fasteners	2	PASS	2	PASS	2	PASS	2	PASS
Bracket to hoop weld length, mm	84	PASS	80	PASS	88	PASS	73	FAIL
Bracket thickness, mm	2	PASS	2	PASS	2	PASS	2	PASS
Bracket perimeter, mm	159		167		154		90	
Skin thickness, mm	1,3		1,4		1,4		1,4	
Insert Perimeter, mm	119		129		151		130	
Skin thickness, mm	1,3		1,4		1,4		1,4	
Backing plate thickness, mm	2	PASS	2	PASS	2	PASS	2	PASS
Backing plate perimeter, mm	119		129		151		90	
Edge distance, mm	192		149		84		91	
Skin shear strength, MPa	137		137		137		137	
Perimeter shear strength, kN	51	PASS	56	PASS	58	PASS	42	PASS
Perimeter shear strength, kN	44	PASS	49	PASS	57	PASS	42	PASS
Tearout strength, kN	141	PASS	113	PASS	63	PASS	69	PASS
Insert images of each attachment point proving the values entered above and proof that the brackets are adequately stiff (stresses are acceptable when loaded with 30kN):								

Obr. 2-25 Přednastavený výpočet v dokumentaci SES

Oba zmíněné vztahy (7) a (8) platí pouze pro kvazistatické zatížení v kolmém směru. Návrh by měl mít dostatečnou bezpečnost a být vyzkoušen ještě dynamickým testováním. Ve vozidle na něj působí proměnné zatížení a vibrace.



Obr. 2-24 Inserty po vyřezání vodním paprskem



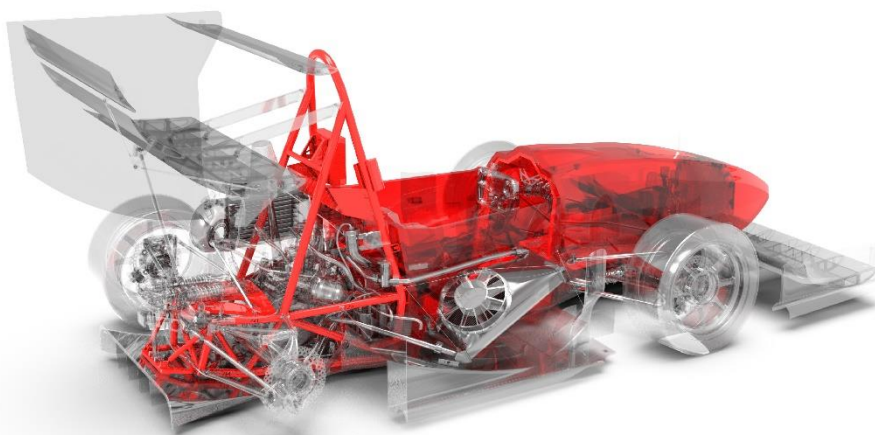
## 2.12 ŘEŠENÍ ULOŽENÍ DRŽÁKŮ RAMEN A TLUMIČŮ

Uložení držáků ramen a tlumičů je u monokoku mnohem jednodušší než u trubky, protože lze přesně natvarovat a nemusí se do daného bodu umísťovat uzel trubek kvůli přenosu sil.

Pro dimenzování insertů, držáků a kontroly bezpečnosti se dají opět použít vztahy (7) nebo (8). Platí ale stejné podmínky jako u návrhu spojení monokoku a rámu. Výpočet počítá pouze s kolmým zatížením a kvazistatickým průběhem.

## 2.13 FINÁLNÍ CAD MODEL

Po čtyřech měsících iterací návrhu a výpočtech je uzavřený CAD model. Na jeho základu se mohou začít chystat modely forem na výrobu monokoku a přípravky na svaření trubkové části a všech dalších komponent.



*Obr. 2-27 Render finální sestavy rámu*

### 3 KONSTRUKČNÍ ČÁST - VÝROBA

#### 3.1 PROBLÉMY S VÝROBOU SENDVIČOVÝCH PANELŮ

Po návrhu skladby jednotlivých panelů se vyráběly vzorky a objevil se první problém. Při výrobě na plochých deskách se při vytvrzování v autoklávu voštiny bortily ze stran do svého středu. Tento problém se podařilo vyřešit pomocí výroby ocelových rámečků, které se od vzorku po vytvrzení odřízly.

Dalším možným řešením je použití úkosů s 30° a méně stupni, které jsou v ideálním případě přesně obráběné, jelikož každá vada zhoršuje propadání. Jiným řešením může být aplikace tlaku maximálně 2 bary. Případně vyplnění hran plnicem nebo obložením pěnovým jádrem. Ideální použít všechny tyto způsoby společně v závislosti na typu dílu a tloušťce.

K tomuto problému s borcením naštěstí nedochází v průběhu vytvrzování monokoku, protože zde nepůsobí přetlak v žádném místě na boční stěnu voštiny, ale vždy na stranu horní, nicméně není vhodné používat příliš vysoké tlaky.

Dalším z problémů je zpracovatelnost větších tloušťek jádra na nerovných plochách. Při tloušťce voštinového jádra nad 30 mm už je voština sama natolik tuhá, že se velice špatně zpracovává a rozhodně bych to nedoporučoval. U voštin nad 20 mm je zpracování s obtížné a při nižších tloušťkách už je bez problému.

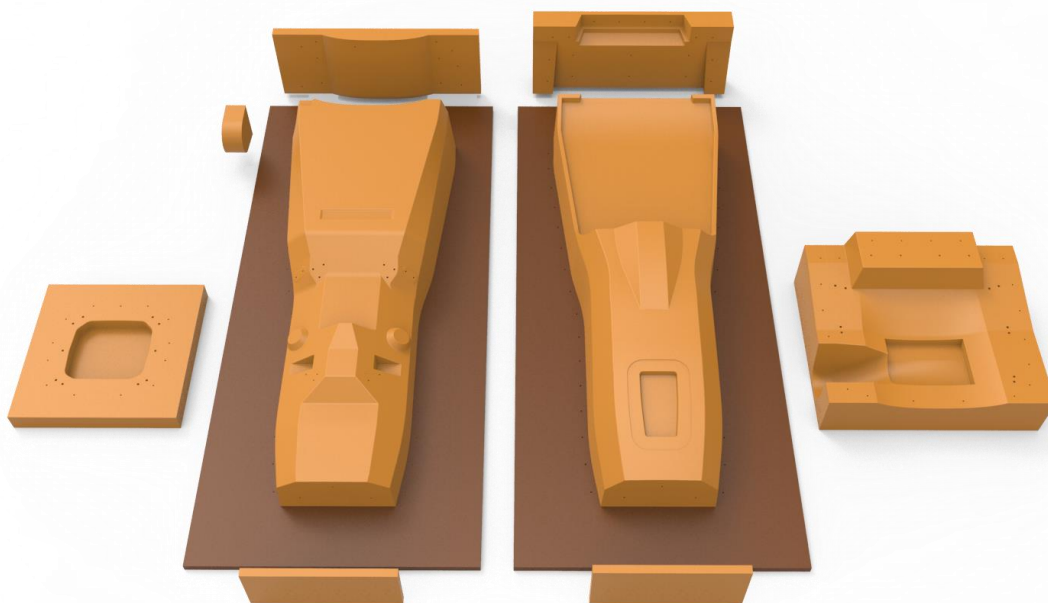
#### 3.2 POZITIVNÍ FORMY

Prvním krokem výroby samotného monokoku je vyrobení pozitivních forem. Nejlepším řešením je využití jako materiálu epoxidových bloků, které mají tepelnou stabilitu i za zvýšené teploty. Materiálem na negativní formy je poté použit formovací prepreg, který se dá vytvrzovat při nižší teplotě, aby nedošlo k velké roztažnosti formy vlivem tepla. Po vytvrzení se musí taková forma ještě temperovat na výdrž vyšší teploty, ale už bez formy pozitivní. Výhodou je vysoká kvalita povrchu a přesnost forem. Nevýhodou je velice vysoká cena, která se vyplatí pouze v sériové výrobě.

Pro prototypovou výrobu v prostředí formule student v Brně je vhodnější využít jiné řešení. Možnosti jsou obrobené MDF desky nebo umělé dřevo. S přihlédnutím ke zkušenostem v minulosti se rozhodlo použít umělého dřeva SIKKA M 440.

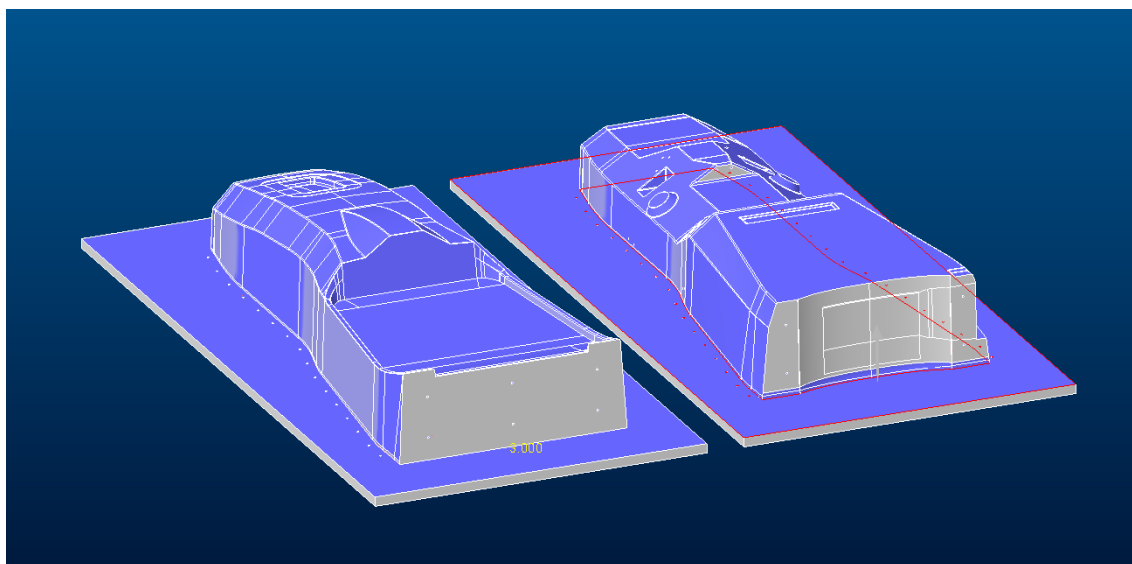
Navrhl a vyrobil se polotovár, který byl slepen z menších bloků, aby výsledný tvar odpovídal přibližné podobě výsledné formy. Ušetří se materiál a také strojní čas 5-osého obráběcího centra, které bylo nezbytné kvůli nedostupným místům pro tří-osé obrábění. Dalším možným řešením výroby těchto forem by mohlo být vrstvení obrobených desek na sebe a jejich přesným spojením.

Na výrobu čtyř negativních forem bylo zapotřebí celkem devíti pozitivní forem.



*Obr. 3-1 Pozitivní formy potřebné pro výrobu*

Pro vyhnutí se problému s odformováním se při návrhu u všech forem kontroluje odformovací úkos. Je také velmi vhodné na formách nachystat dostatečný prostor pro výrobu lemu, který spojuje formy k sobě, aby se při výrobě negativního formy nemuselo obtížně pracovat na omezeném prostoru.



*Obr. 3-2 Analýza odformování*

Formy po vyfrézování mají velkou pórovitost a jejich povrch se musí nejprve upravit. Formy se upravují lehkým přebroušením a napuštěním plniče pórů. Tento krok včetně přebroušení se několikrát opakuje. V další fázi se aplikuje stříkací pistolí klasický plnič. Následuje cyklus několika přestříkání a přebroušení. Po této fázi by měla mít forma velmi hladký povrch. Ten se poté může ještě zalakovat, aby se dosáhlo vysokého lesku formy nebo se pouze zaleští.

Výsledkem je dokonalý a přesný povrch. Každá vada, která se zanedbá se přenesse na další formu a projeví se na finálním díle.

V posledním kroku se hotové pozitivní formy musí pečlivě naseparovat pomocí voskových nebo tekutých separátorů, aby se předešlo slepení formy s laminátem.



*Obr. 3-3 Kontrola kvality povrchu na pozitivní formě*

### 3.3 NEGATIVNÍ FORMY

Pro zajištění co největší geometrické přesnosti finálního dílu je vhodné, aby i forma měla stejnou teplotní roztažnost jako materiál ze kterého je vyroben monokok. Proto se pro výrobu negativních forem použily uhlíkové tkaniny.

Pokud se nepoužijí formovací prepregy, ale klasické suché tkaniny, je potřeba je prosytit pryskyřicí. Jsou dvě možnosti, laminovat ručně nebo pomocí infuze. Pomocí infuze se dá dosáhnout lepšího výsledku, ale tato metoda vyžaduje více zkušeností s touto technologií. Při nesprávném postupu může dojít k vyrobení nepoužitelných forem.

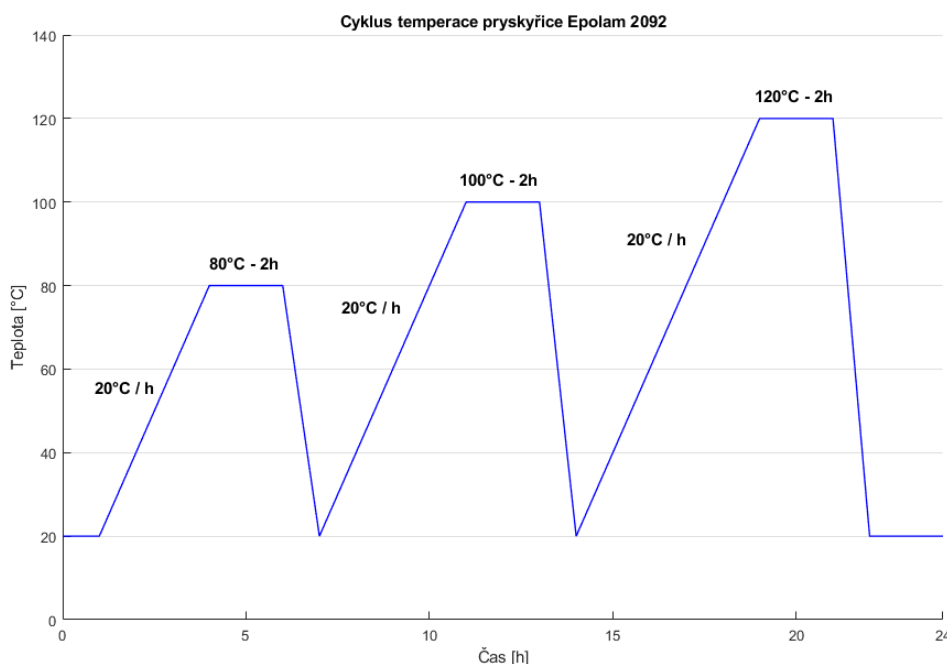
Při výrobě mokřým laminováním se pomocí povrchové pryskyřice Biresin S8 vytvoří dokonale souměrný povrch. Aby se vyhnulo vadám povrchu je vhodné pryskyřici odplynit ve vakuovací komoře. Tato povrchová vrstva se nechá zgelovatět a poté se na ní pokládají suché tkaniny, které se prosycují pomocí štětce pryskyřicí Epolam 2092.



Je důležité vybrat správnou pryskyřici a to hned z několika důvodů. Prvním je minimální doba zpracovatelnosti, protože položení zhruba 10 vrstev trvá asi 6 hodin práce. Dalším je způsob vytvrzení pryskyřice a její teplotní odolnost. Při aplikaci vyšší teploty a tlaku v autoklávu by nízká teplotní odolnost nepříznivě ovlivnila vyrobený díl zkroucením nebo smrštěním. Aplikace tlaku na nedostatečně tuhé formě by mohla způsobit stejné problémy. V závislosti na místě a geometrické tuhosti by na celé formě měla být minimální tloušťka 5mm.

Pro usnadnění výroby této formy je vhodné používat tkaniny o vyšší gramáži. Po prosycení a položení dostatečného počtu vrstev se celý díl pokryje strhávací tkaninou, která usnadňuje sundávání poslední vrstvy odsávací tkaniny, která slouží k rovnoměrné distribuci vakua po formě. Celá forma se poté ještě zabalí do vakuovací a dokonale se utěsní. Díl se pomocí vývěvy zavakuuje a forma se nechá vytvrdit pomocí exotermické reakce. Tento proces se dá urychlit částečným zvýšením teploty okolního prostředí. Je třeba dát pozor, aby se při vakuování neobjevily tzv. mosty - místa, kde nedoléhá fólie na povrch formy. Ty mohou způsobit protržení fólie nebo nedokonalé prosycení daného místa, které vede ke vzniku vzduchových bublin. Tyto bubliny se při přetlaku v autoklávu bortí a způsobují defekty.

Po dostatečném vytvrzení se negativní forma odformuje. V případě lokálních defektů se pomocí povrchové pryskyřice opraví a zabrousí se dané místo. Pro zvýšenou tepelnou výdrž se forma nechává temperovat pomocí cyklu postupného zvyšování teploty (Obr. 3-4).



Obr. 3-4 Temperační cyklus negativních forem

Volitelným krokem může být vložení do autoklávu a simulace cyklu vytvrzování dílu. Po vytažení se objeví většina neviditelných vad jako propadené vzduchové bubliny a jiné. Forma se následně ještě opraví, přebrousí a vyleští.

Aby se zaplnili mikropóry ve formě použije se penetrační nátěr B-15 od Loctite. Tento se nanáší minimálně ve dvou tenkých vrstvách s minimálním rozestupem 30 minut. Poslední vrstva se

nechá 24 odležet nebo se vytvrdí za zvýšené teploty. Následuje separace pomocí tekutého separátoru Loctite 770 NC.

Formy jsou nyní nachystané pro samotné laminování finálního dílu.

### 3.4 LAMINOVÁNÍ

Prepreg se musí uchovávat v mrazícím boxu za teploty  $-18^{\circ}\text{C}$ , aby nedošlo k jeho pozvolnému vytvrzování. Většinou se udává použitelnost prepregu po dobu 30 dní na pokojové teplotě, nicméně charakter této trvanlivosti je kumulativní a po každém vytáhnutí z mrazu se životnost krátí. Před začátkem pokládání je důležité vytažený prepreg nechat zabalený aklimatizovat na okolní teplotu. Během této doby totiž nízká teplota přitahuje okolní vzdušnou vlhkost, která by měla negativní vliv na vlastnosti. V profesionálním prostředí se kontroluje teplota a vlhkost i při výrobě. V našich podmínkách stačí pouze toto ochranné opatření.

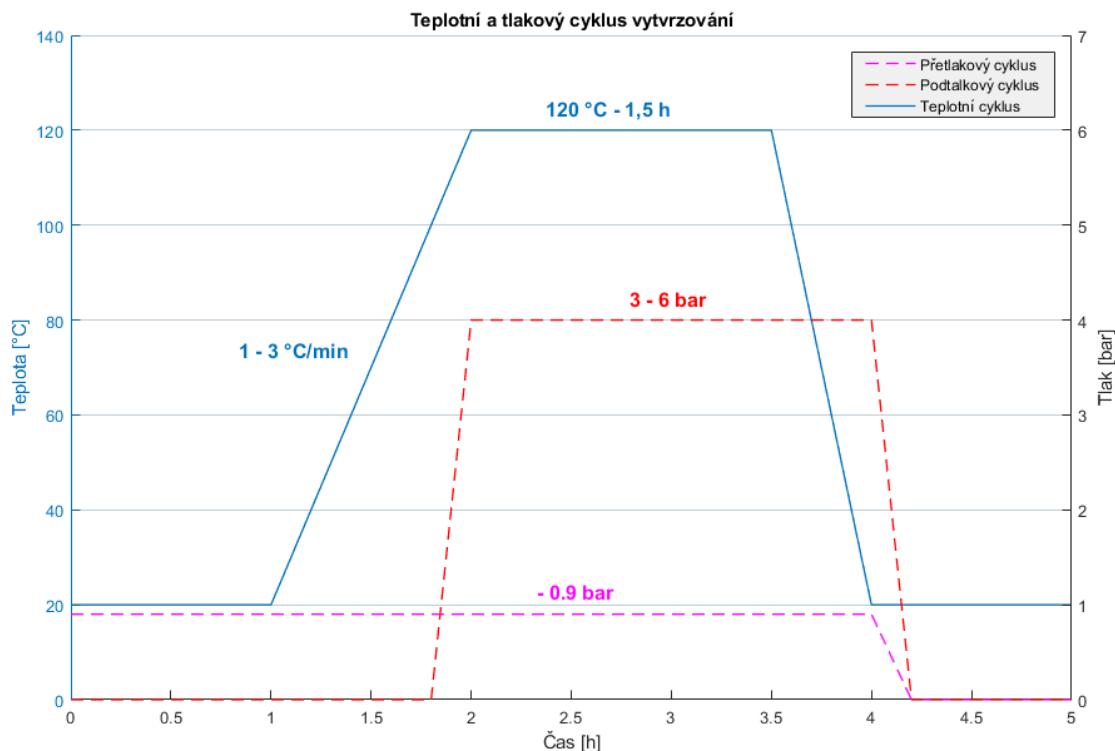
Pokud jsou nachystané digitální podklady, dá se použít pro řezání požadovaných tvarů tkanin plotr. Jednodušší variantou v případě nesériové výroby je pomocí šablon z formy nastříhat požadované tvary v požadovaném směrech.

Nastříhané tkaniny prepregu se poté začnou pokládat na formu podle připraveného dokumentace tzv. plybooku. Po naskládání pohledové vrstvy se všechny čtyři negativní formy spojí a další pokládání probíhá v uzavřeném prostoru, aby mohl být výsledný díl vytažený jako jeden kus a nemusely se k sobě lepit vylaminované poloviny monokoku. Tato fáze pokládání trvá i několik dní než se podaří naskládat vnější potah.



*Obr. 3-5 Pokládání první vrstvy vnějšího potahu*

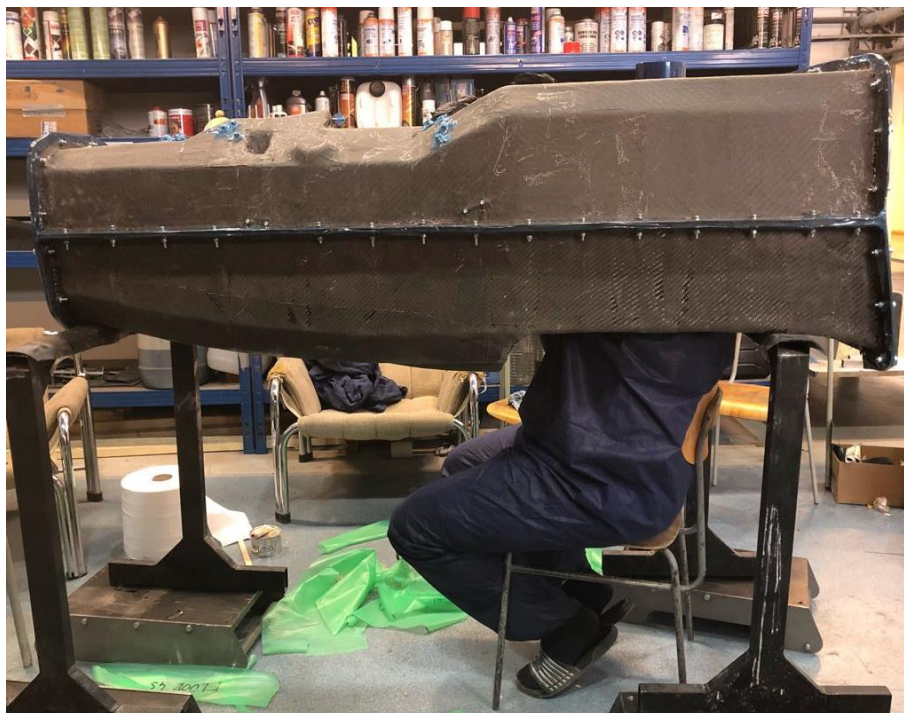
Po vyskládání se musí opět jako u negativních forem nachystat zabalení monokoku pro první vytvrzení. V této fázi je to ještě mnohem důležitější než u negativních forem, protože v autoklávu bude kromě podtlaku 0,9 bar působit i přetlak až do 6 barů. Proto není žádným problémem protrhnout vakuovací fólii při nesprávném zabalení.



Obr. 3-6 Vytvrzovací cyklus vnějšího potahu monokoku

Po vytvrzení vnějšího potahu následuje lepení voštin na vnější potah za pomoci speciálních foliových lepidel, která při zvýšení teploty částečně expandují a spojí potahy s voštinou. Obtížná místa nebo místa, kde není voština kolmo k potahu je vhodné nahradit pěnou, která má izotropní vlastnosti a dostatečnou tepelnou odolnost. Kromě voštin se umísťují inserty vyřezávané vodním paprskem z ertalonové desky na kolíky připravené ve formě pro přesné pozicování držácků. Místo kolíků se k pozicování dá použít i laserové promítání nebo promítání pomocí 3D skenerů. Záleží také na tom jestli jsou inserty průchozí. V této fázi byl do monokoku přilepen i přední oblouk.

Na inserty a voštiny se opět položí další vrstva foliového lepidla a naskládají se tkaniny vnitřního potahu. Následuje stejný postup jako v případě balení vnější vrstvy a monokok se opět nechá vytvrdit. V tomto případě se sníží přetlak v autoklávu na pevnost jádrového materiálu, aby nedošlo k jeho deformaci nebo zborcení.



*Obr. 3-7 Pokládání tkanin uvnitř monokoku*

Po druhém vytvrzení následuje fáze odformování dílu a broušení drobných vad a lehké přebroušení celého povrchu jemným papírem od tenkého filmu, který mohl zůstat po separátoru a monokok se může nalakovat.



*Obr. 3-8 Vytvrzený a nalakovaný monokok*



Poslední fází výroby rámu je propojení trubkového části s monokokem. Pomocí přípravku se k sobě napasují obě části a dovaří se držáky.



*Obr. 3-8 Spojení trubkové a kompozitní části*

Po spojení proběhne skenování rámu a kontrola normálových odchylek CAD modelu oproti výslednému rámu. Nepřesnosti vzniklé na spojení a během výrobních procesů se nyní mohou kompenzovat na zadních držácích zavěšení, díky čemuž zůstane na vozidle navržená kinematika.

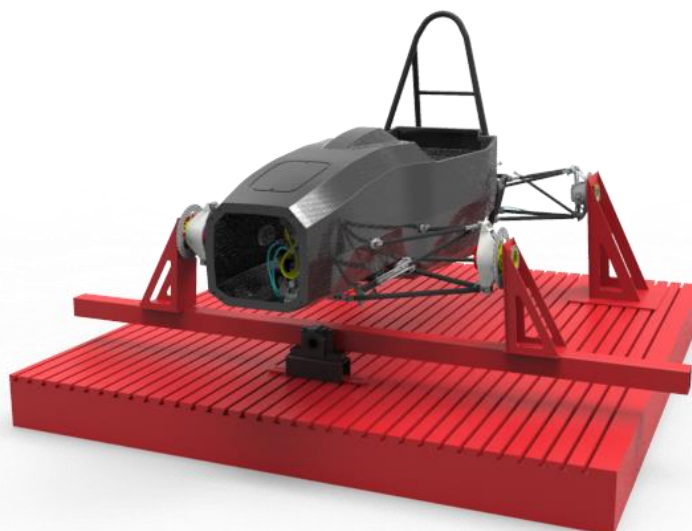


*Obr. 3-7 Skenování trubkové části*

### 3.5 MĚŘENÍ TORZNÍ TUHOSTI

Posledním krokem je měření torzní tuhosti vozidla. Návrh přípravku na měření vytvořil kolega Ing. Martin Děřda.[3][14] V letošním roce byl přípravek jenom mírně poupraven. Jedná se především o uchycení přípravku přímo na unášecí kolíky náboje oproti předchozím letem, kde pro účely měření byly vyrobeny náhrady těhlic.

Zásadnější změnou je využití kromě odchylkových úchylkoměrů i fotogrammetrické měření systémem ATOS TRITOP. Toto měření poskytne hned několik výhod, především díky možnosti určit lokální tuhosti jednotlivých částí vozu. Výsledné hodnoty budou přesnější díky většímu množství měřených bodů a jejich statistickému zpracování.



*Obr. 3-9 Navržený přípravek pro měření torzní tuhosti*

### 3.6 ZHODNOCENÍ

U hybridního rámu je situace složitá, protože se musí věnovat pozornost dvěma zcela rozdílným strukturám, které na sebe musí dokonale pasovat. Návrh a výroba tohoto konceptu trvá nejdéle ze všech možných. Důvodem je, že nestačí vyrobit formy a vylaminovat monokok nebo vyrobit přípravek a svařit rám, ale musí se provést obě tyto činnosti a na konci díly spojit do jednoho kusu. Aby výroba probíhala co nejrychleji, je potřeba pracovat paralelně a střídát pozornost od jedné části k druhé. Samotná výroba monokoku je také náročný proces trvající několik týdnů. Využití před-impregnovaných tkanin přináší několik pozitiv. Na rozdíl od mokrého laminování je na celém díle zaručen správný poměr výztuže a matrice a na pokládání tkanin je dostatek času. Dalším pozitivem je výsledná kvalita povrchu a práce v čistém prostředí.

## ZÁVĚR

Hlavním cílem bylo navrhnutí chassis vozidla Dragon 8, které překoná předchozí rámy týmových vozidel a otevření nového prostoru pro zlepšení. Příspěvek k tomu měla především nová technologie výroby a kvalitnější materiály. Bylo nezbytné k tomuto úkolu přistupovat s velkou zodpovědností, protože na výsledku práce závisí jak bezpečnost řidičů, tak účast na závodech a úsilí věnované ostatními členy týmu.

První část je velmi stručně věnovaná představení soutěže a týmu TU Brno Racing. Jsou přiblíženy jednotlivé koncepty rámu používaných ve formuli student s poukázáním na jejich hlavní přednosti a zápory. Na konci teoretické části se pojednává o kompozitních materiálech a výhodách využití sendvičových materiálů.

V praktické části se autor zabývá návrhem. Po koncepční analýze dochází k závěru, že nejlepším řešením je hybridní rám s uhlíkovým monokokem v přední části a ocelovou trubkovou zadní částí. Je popsána tato konstrukce a jsou stanoveny cíle, kterých se drží během celého návrhu a optimalizace. V této části práce jsou popsány ty nejdůležitější parametry a kroky, které vedly k vytvoření finálního návrhu. Od referencí pro počáteční model a vytvoření skeletu trubkové části, se přechází na kontrolu návrhu s geometrickými omezeními z hlediska bezpečnosti. Po měření ergonomie je do modelu přidán řidič a vytvořen návrh sedačky. Je poukázáno na konstrukční problémy s předním obloukem, problém s kolizí turbodmychadla a také nutné geometrické ústupky kvůli upevnění tlumičů, vahadel a ramen. Z důvodu změny materiálu na výrobu monokoku oproti poslední sezóně se měřily materiálové vlastnosti na tahové zkoušce. Na základě výsledků byla vytvořena nová skladba jednotlivých panelů a byly vytvořeny a testovány vzorky těchto panelů na průrazových a ohybových zkouškách. Praktická část výroby monokoku popisuje jednotlivé kroky výroby nutné k vyrobení kompozitního dílu pomocí technologie před-impregnovaných tkanin. V samotném závěru je zmíněno měření torzní tuhosti, která proběhne až po odevzdání práce z důvodu zdržení přípravku ve výrobě.

Ačkoliv je největším nepřítelem omezený čas, kdy za sedm měsíců bylo potřeba nastudovat problematiku, vytvořit kompletní návrh, provést výpočty, simulace, testování, zajistit technologii výroby, objednat materiál a vozidlo vlastnoručně postavit, tak se podařilo dosáhnout stanovených cílů. Je vyrobený funkční prototyp rámu Dragon 8 a zároveň se podařilo snížit hmotnost pod stanovenou hranici na 27,9 kg a zachovat výšku těžiště. Pevně věřím, že torzní tuhost se také nachází v požadovaných hodnotách a doufám, že i díky návaznosti na tuto práci se týmu podaří příští rok zase posunout hranice vozu k lepším výkonům.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Competition, Formula Student Germany, [online]. 8.5.2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://bit.ly/2I5xisg>
- [2] CLARKE, Pat. Back to basics. In: <https://www.formulastudent.de> [online]. 2016 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [/news-details/article/pats-corner-back-to-basics/](#)
- [3] PETRO, Pavol. *Torzní tuhost rámu vozidla Formule Student*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [4] ROYCE, Suzanne. *Learn & compete A primer for Formula SAE*. Racecar Graphic Limited, 2012, 255 s., ISBN 978-0-95333524-7-0
- [5] AMZ Pilatus monocoque. AMZ facebook [online]. 8.5.2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://bit.ly/2jEkoqD>
- [6] Racecar Engineering: Formula Student 2013 [online]. 2013, 32 s. [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: <http://www.racecar-engineering.com/formula-student-2013-event-review/>
- [7] KINDER, J. Corrosion Books: ASM Handbook Vol. 21. *Materials and Corrosion* [online]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2002, **53**(11), 858-858 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1002/1521-4176(200211)53:11858::AID-MACO8583.0.CO;2-E. ISSN 0947-5117.
- [8] KRISHAN KUMAR CHAWLA. *Composite materials science and engineering*. 3rd ed. New York: Springer, 2012. ISBN 978-038-7743-653.
- [9] GRM Catalog, GRM Systems, [online] 24.5.2018 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: [http://www.grm-systems.cz/sites/default/files/download/grm\\_katalog\\_web.pdf](http://www.grm-systems.cz/sites/default/files/download/grm_katalog_web.pdf)
- [10] HEXCEL, HexPly Prepreg. [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-DataSheets/Prepreg\\_Technology.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-DataSheets/Prepreg_Technology.pdf)
- [11] STANĚK, Lukáš. Návrh skladby sendvičového kompozitního materiálu pro dopravní a stavební aplikace. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013, 83 s., 17 s. příloh. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/24934>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Rusnáková, Soňa.
- [12] Formula Student Germany [online]. 2016 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2018/rules/FS-Rules\\_2018\\_V1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2018/rules/FS-Rules_2018_V1.1.pdf)
- [13] Zircoflex Gold, Zircotec, [online] 8.5.2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.zircotec.com/zircoflex/zircoflex-gold/>
- [14] DĚRDA, Martin. *Návrh rámu vozidla Formule Student*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017, 72 listů:.



- [15] ŽÍDEK, Tomáš. *Aplikace sendvičové konstrukce na formulový vůz*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [16] MCBEATH, Simon. *Competition car composites: a practical handbook*. Somerset: Haynes Publishing, 2008, 208 s. : il. ; 24 cm. ISBN 978-1-85960-624-7.
- [17] HEXCEL, Honeycomb Attributes and Properties. [online].[cit. 2016-04-10]. Dostupné z: [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-DataSheets/Honeycomb\\_Attributes\\_and\\_Properties.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-DataSheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf)

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$a$	[m/s <sup>2</sup> ]	zrychlení
CAD		computer aided design
$E_l = E_L$	[GPa]	Youngův modul pružnosti v tahu v podélném směru
$E_2 = E_T$	[GPa]	Youngův modul pružnosti v tahu v příčném směru
$E_f$	[GPa]	Youngův modul pružnosti v tahu vlákna
$E_m$	[GPa]	Youngův modul pružnosti v tahu matrice
$F$	[N]	síla
FB		front bulkhead – přední přepážka front bulkhead support structure – podpůrná konstrukce přední
FBSS		Přepážky
FH		front hoop – přední oblouk
FHB		front hoop bracing – podpora předního oblouku
$G_{12}$	[GPa]	smykový modul
HM		high modulus
HS		high strength
Chassis		v této práci myšleno jako rám vozu
IM		intermediate modulus
$m$	[kg]	hmotnost
MAG		metal aktiv gas
MH		main hoop – hlavní oblouk
MHB		main hoop bracing – podpěry hlavního oblouku main hoop bracing support – podpůrná struktura podpěr hlavního
MHBS		oblouku
MKP		metoda konečných prvků
Percy		95th percentile male
SAE		Society of automotive engineers
SES		structural equivalency spreadsheet shoulder harness bracing support – struktura uchycení ramenních
SHBS		pásů
SIS-hor		side impact structure horizontal – boční nárazová struktura
SIS-ver		horizontální
$S_{min}$	[mm <sup>2</sup> ]	side impact structure vertical – boční nárazová struktura vertikální
$t$	[mm]	minimální plocha lepeného spoje tloušťka

TIG		tungsten inert gas
$V_f$	[-]	objemový podíl vlákna v kompozitu
$V_m$	[-]	objemový podíl matrice v kompozitu
$\theta$	[°]	směr vláken kompozitu
$\mu$	[-]	Poissonovo číslo
$\sigma_{UTS}$	[MPa]	mez pevnosti v ohybu
$\tau$	[MPa]	smyková pevnost lepidla
$\tau_{\text{shear}}$	[MPa]	stříhová pevnost kompozitu

## SEZNAM PŘÍLOH